Über die Ausbreitung der von Großkolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe

---

Von der

Technischen Hochschule zu Breslau

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. **Gerhard Bornitz**
aus Ratzeburg

Referent: Prof. Dr. L. Mintrop
Korreferent: Prof. Dr. Groß

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Februar 1931

Verlagsbuchhandlung Julius Springer · Berlin 1931

Über die Ausbreitung der von Großkolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe

---

Von der

Technischen Hochschule zu Breslau

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. **Gerhard Bornitz**

aus Ratzeburg

Referent: Prof. Dr. L. Mintrop

Korreferent: Prof. Dr. Groß

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Februar 1931

Verlagsbuchhandlung Julius Springer · Berlin 1931

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548224_0179

Lebenslauf.

Am 23. Juli 1902 wurde ich als Sohn des Studienrats Professor Fritz Bornitz in Ratzeburg-Domhof (Mecklenburg) geboren.

Nach Versetzung meines Vaters nach Berlin-Grunewald besuchte ich das dortige Gymnasium, legte im Februar 1920 die Reifeprüfung ab und begann, mich durch praktische bergmännische Tätigkeit auf Studium und Beruf vorzubereiten. Im Herbst 1921 ließ ich mich an der Technischen Hochschule Berlin immatrikulieren und legte im Sommer 1926 die Diplom-Hauptprüfung der Fachrichtung für Bergbau ab.

Im Anschluß daran war ich vier Jahre hindurch in Texas und Louisiana auf dem Gebiet seismischer Lagerstättenerkundung für eine deutsche Firma tätig. Im Sommersemester 1930 und im Wintersemester 1930/31 besuchte ich die Vorträge über angewandte Geophysik an der Technischen Hochschule zu Breslau und bearbeitete die vorliegende Dissertation.

Herrn Prof. Dr. L. Mintrop spreche ich für die Anregung zu dieser Arbeit meinen verbindlichsten Dank aus.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung 1
Die Art der untersuchten Schwingungen 2
Beschreibung der untersuchten Objekte 5
1. Blücherschächte 5
2. Delbrückschächte 10
Das Aufnahmegerät, seine Wirkungsweise und Abänderung für die vorliegende Aufgabe 14
Die Messungen im Gelände 19
1. Blücherschächte 19
2. Delbrückschächte 23
Die Auswertung der Diagramme 25
Die Versuchsergebnisse 33
1. Blücherschächte 33
a) Über Tage 33
b) Unter Tage 33
c) Profildarstellung der Messungsergebnisse auf den Blücherschächten 38
2. Delbrückschächte 38
a) Vorbemerkung 38
b) Messungsergebnisse über Tage 42
c) Messungsergebnisse unter Tage 42
d) Profildarstellung der Messungsergebnisse auf den Delbrückschächten . . . 42
Zusammenfassung 43
Benutzte Literatur 43

Tafeln am Schluß des Buches:

Tafel I: Blücherschächte, Auszug aus dem Hauptgrundriß.
Tafel II: Delbrückschächte, Auszug aus dem Hauptgrundriß.
Tafel III: Blücherschächte, Profil *ABC*.
Tafel IV: Delbrückschächte, Profil *ABC*.
Tafel V: Delbrückschächte, Profil *XYZ*.

Einleitung.

In der vorliegenden Arbeit soll versucht werden, eine besondere Art künstlich erregter „Erdbeben", die von den Massendrucken von Großkolbenmaschinen ausgehenden Bodenschwingungen, in die Tiefe zu verfolgen. Derartige Schwingungen sind zuerst von Mintrop in dessen grundlegender Arbeit[1] untersucht worden. Ihre Ausbreitung über ganz überraschend große Flächen veranlaßte Mintrop schon damals zu der Vermutung, daß sie auch in großen Tiefen noch meßbar seien. Nebenstehende Abb. 1 ist der erwähnten Veröffentlichung entnommen. Sie zeigt Schwingungen einer Großgasmaschine über Tage und in dem unter der Maschine befindlichen Bergwerk in 400 m Tiefe. Es ist dies meines Wissens die einzige Veröffentlichung der Messung einer an der Erdoberfläche erzeugten periodischen Schwingung in größerer Tiefe. Die Ausbreitung der Schwingungen an der Erdoberfläche in näherer und weiterer Entfernung von einer Maschine ist nach Mintrop noch von verschiedenen Autoren untersucht worden, insbesondere von Heinrich[2], der die Abhängigkeit der Schwingungen von der Bodenbeschaffenheit bearbeitet hat.

Periodische Schwingungen mit Tonfrequenz sind erstmalig von R. A. Fessenden zur Feststellung von Erzkörpern im Untergrunde benutzt worden (U. S. Patent Nr. 1240328 vom 18. September 1917). Fessenden ordnet die akustischen Sender und Empfänger in mit Wasser gefüllten Bohrlöchern an und mißt die Laufzeiten der Wellen sowie ihre Reflexionen an Einlagerungen höherer Elastizität. Außer der Beschreibung der Anordnung der Versuche und Darstellung des Strahlenganges der akustischen Wellen enthält die Patentschrift von Fessenden keine weiteren Angaben und insbesondere keine Ergebnisse praktischer Durchführung des Verfahrens.

Ich habe nun die oben genannte kurze Mitteilung in der Arbeit von Mintrop, daß die von Maschinen erzeugten Schwingungen in großer Tiefe meßbar sind, als Ausgangspunkt für eine nähere Untersuchung benutzt. Eine Möglichkeit dazu war mir durch das freundliche Entgegenkommen der Verwaltungen der Blücher- und Delbrückschächte (Oberschlesien) gegeben, denen ich an dieser Stelle meinen verbindlichsten Dank zum Ausdruck bringen möchte. Insbesondere sei der freundlichen Erlaubnis und Unterstützung der Arbeiten durch Herrn Generaldirektor Vogt, Direktor Brandenberg, Markscheider Luppa und Ingenieur Farny von der Fürstlich Donnersmarckschen Verwaltung, ferner den Herren Bergwerksdirektor Bergrat Baumann, Bergassessor Herrmann, Bergverwalter Sagener und Markscheider Bobisch von der

[1] Mintrop, L.: Über die Ausbreitung der von den Massendrucken einer Großgasmaschine erzeugten Bodenschwingungen. Dissertation Göttingen 1911.

[2] Heinrich, Dipl.-Ing. A.: Über die Ausbreitung von Bodenschwingungen in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Untergrundes. Dissertation Breslau 1930.

Verwaltung der Preußischen Bergwerks- und Hütten-A.-G., Zweigniederlassung Hindenburg O/S., in Dankbarkeit gedacht.

Auf den Blücher- und Delbrückschächten konnte ich die Ausbreitung der von Großkolbenmaschinen erzeugten Schwingungen entlang der Erdoberfläche wie auch bis zu 250 bzw. 530 m Tiefe messen. Dadurch wurde es möglich, sowohl den Absorptionskoeffizienten für die flächenhafte Ausbreitung an der Erdoberfläche sowie für die räumliche Ausbreitung nach der Tiefe hin zu ermitteln. Ferner konnte der Einfluß untersucht werden, den die verschiedene Beschaffenheit der in der Tiefe anstehenden karbonischen Sandstein- und Schiefertonschichten gegenüber dem aus Sanden und Tonen bestehenden tertiären Deckgebirge auf die Amplitude der Schwingungen ausübt.

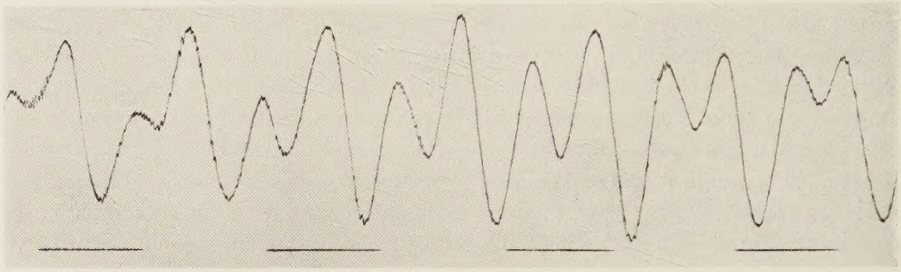


Abb. 1a. Originaldiagramm der durch einen Großgasmotor von 1200 PS und 107 Touren/Minute erzeugten Bodenschwingungen. Vergrößerung $V = 5500$.
Aufgenommen an der Erdoberfläche in 210 m Entfernung von dem Motor.

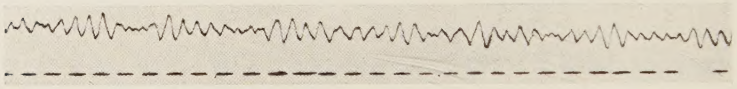


Abb. 1b. Originaldiagramm der Bodenschwingungen desselben Ursprungs. Aufgenommen 400 m unter der Erdoberfläche und in 100 m Horizontalabstand von der Maschine. $V = 5500$.

Abb. 1. Seismische Registrierung von Schwingungen über und unter Tage. (Aus der Dissertation L. Mintrop.)

Für die Beobachtungen selbst stellte mir die Berggewerkschaftliche Erdbebenwarte in Bochum freundlicherweise einen photographisch registrierenden Dreikomponentenapparat nach Mintrop zur Verfügung, und ich möchte nicht verfehlen, den Herren Professor Dr.-Ing. e. h. Heise und Markscheider Löhr von der Westfälischen Berggewerkschaftskasse meinem verbindlichsten Dank Ausdruck zu geben.

Die Art der untersuchten Schwingungen.

Die störenden Kräfte am Schubkurbelgetriebe erregten in dem Augenblick das besondere Interesse der Ingenieure, als sie bei Schiffsmaschinen mit den steigenden Ansprüchen an deren Leistung derartige Ausmaße annahmen, daß der Gesamtverband der Schiffskörper gefährdet erschien. Die Wege, die der Schiffsmaschinenbau zu ihrer Bekämpfung erfolgreich beschritten hat[3], sind aus wirtschaftlichen Gründen im Betrieb ortsfester Maschinen nicht gangbar; man begnügt sich vielmehr mit der Anbringung eines Gegengewichts und überläßt die

[3] Siehe die Untersuchungen von Schlick: Z. V. d. I. **1905**, S. 1501.

restlichen freien Kräfte dem Fundament zur Aufnahme. Über Fundamentschwingungen liegen Untersuchungen vor, von denen die Arbeit von Sauer besonderer Erwähnung bedarf[4]. Sauer untersucht, in welcher Weise die träge Masse, die federnde Kraft des Bodens und die aus beiden resultierende Eigenschwingungszahl des Fundaments die Ausmaße und Phasenverschiebung beeinflussen, mit denen sich die Massenschwingungen der Maschine auf das Fundament übertragen. Auf diese Abhängigkeitsverhältnisse braucht im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht eingegangen zu werden; es ist lediglich festzuhalten, daß die Massendrucke, wie sie weiter unten an Hand der gewählten Beispiele im einzelnen durchgerechnet werden, für das Schwingungsbild des Fundaments im wesentlichen maßgebend bleiben.

Das Fundament teilt seine Bewegung dann dem Baugrund mit, der in großem Umkreis in Schwingungen versetzt wird. Die Ausbreitung solcher Schwingungen ist in der bereits erwähnten Arbeit von Heinrich[2] an Hand des Beispiels einer Kolbendampfmaschine der Schlesischen Zellulose und Papierfabrik, Maltsch a. d. Oder, studiert worden. Es ergab sich das bereits von Mintrop[1] erwähnte Abnahmegesetz für flächenhafte Ausbreitung:

$$y_n = y_1 \sqrt{\frac{x_1}{x_n}} \cdot e^{-\alpha (x_n - x_1)},$$

worin

y_n Amplitude im Abstand x_n,
y_1 Amplitude im Abstand x_1,
e Basis der natürlichen Logarithmen,
α Absorptionskoeffizient.

Die Gleichung besagt, daß die Gesamtsumme der Energien E_1 und E_n auf zwei konzentrischen Kreisen mit der Energiequelle als Mittelpunkt und x_1 und x_n als Radien konstant ist, wenn man von der Absorption absieht. Es gilt also

$$2\pi x_1 \cdot E_1 = 2\pi x_n \cdot E_n$$

oder

$$\frac{E_1}{E_n} = \frac{x_n}{x_1}.$$

Nun ist die Energie einer Welle dem Quadrat der Schwingungsweite proportional[5], also

$$\frac{E_1}{E_n} = \frac{y_1^2}{y_n^2}$$

und damit

$$y_n = y_1 \sqrt{\frac{x_1}{x_n}}.$$

Hinzu kommt dann noch der Dämpfungsfaktor $e^{-\alpha (x_n - x_1)}$. Darin ist α von der Bodenbeschaffenheit abhängig, einem kleinen α entspricht eine große „Bebenwirkung". Ferner ist auch die Schwingungsdauer der Wellen von großer Bedeutung für den Absorptionskoeffizienten α. Für lange Wellen mit Perioden von einer ganzen Anzahl von Sekunden, die man in der Erdbebenkunde als Oberflächen- oder Hauptwellen bezeichnet, rechnet man nach Angenheister[6] mit

[4] Sauer, Hans: Messung und Rechnung der Fundamentschwingungen von einfachwirkenden Viertakt-Maschinen. Dissertation Darmstadt 1916.

[5] Grimsehl: Lehrbuch der Physik. S. 674. Berlin 1923.

[6] In seiner Arbeit „Seismische Registrierungen in Göttingen im Jahre 1905" (Nachrichten der kgl. Ges. d. Wissenschaften, Mathem.-physik. Klasse, Göttingen 1906) teilt An-

einem Absorptionskoeffizienten von $\alpha = 0{,}00000031/\text{m}$.[7] Für kurzperiodige, durch fallende Gewichte im Boden erzeugte Wellen von etwa 0,02 sec Schwingungsdauer ermittelte Mintrop[8] am Hainberg bei Göttingen (Muschelkalk) den Absorptionskoeffizienten $\alpha = 0{,}0023$. Im allgemeinen dürften die Werte für die hier zu erörternden Maschinenschwingungen von etwa 0,5 sec Periode zwischen den genannten liegen; so lassen die von Mintrop[1] in seiner erstgenannten Arbeit im Leinetal bei Göttingen (wenig mächtige alluviale und diluviale Tal- und

Abb. 2. Lageplan der Blücherschächte. (Reichskarte, Maßstab 1 : 100000.)

Lehmböden über Trias) angestellten Beobachtungen von Maschinenschwingungen nach meiner Berechnung auf einen Absorptionskoeffizienten von $\alpha = 0{,}001$

genheister die Ergebnisse von Untersuchungen mit, die er über die Absorption langer Wellen (ca. 20 sec Periode) bei neun Beben anstellte. Die Werte für α schwanken bei den verschiedenen Beben zwischen $\alpha = 0{,}00018$ und $0{,}00034$ pro km, sie liegen also alle in der gleichen Größenordnung; als Mittelwert ergibt sich $\alpha = 0{,}00031$ pro km oder $0{,}00000031$ pro m.

[7] Die sämtlichen in dieser Arbeit angegebenen Zahlenwerte für α beziehen sich auf die Absorption pro m.

[8] Mintrop, L.: Über künstliche Erdbeben. Berichte des Internat. Kongr. f. Bergbau, angew. Mechanik und prakt. Geologie. Düsseldorf 1910.

schließen. Im einzelnen ist die Absorption sehr stark von den petrographischen Verhältnissen und von der Bodenfeuchtigkeit abhängig: Heinrich[2] ermittelte bei Maltsch (Oder) auf wenig mächtigen trockenen Sanden über mächtigen Tonschichten den überraschend hohen Wert von $\alpha = 0{,}003$, während sich auf dem Marschboden der Oderniederung der Koeffizient $\alpha = 0{,}00001$ ergab.

Im folgenden ist versucht worden, an Hand von zwei Beispielen die Tiefenfortpflanzung derartiger Schwingungen zu studieren.

Beschreibung der untersuchten Objekte.

1. Blücherschächte.

Die Fürstlich Donnersmarckschen Blücherschächte liegen in dem z. Z. polnischen Teil Oberschlesiens, ca. 5 km südsüdöstlich von Rybnik, unweit des Ortes Boguschowitz (Abb. 2). Die geologischen Verhältnisse sind aus dem Profil *A B C* (Abb. 3) ersichtlich, dessen geographische Lage aus dem Grubenriß (Tafel I) hervorgeht. Die örtlichen Verhältnise liegen auf den Blücherschächten insofern besonders günstig für die Untersuchungen, als das Karbon dort von einer mächtigen Tertiärschicht überlagert wird, die eine gute „Bebenwirkung" vermuten läßt. Als Energiequelle standen ein zweistufiger Niederdruck-Kolbenkompressor von 12000 m³ Ansaugeleistung, direkt mit einer Dampfmaschine von 650 PS Leistung gekuppelt, und ein fünfstufiger Hochdruckkompressor von 30 m³ Ansaugeleistung, direkt mit einer Dampfmaschine von 340 PS gekuppelt, zur Verfügung.

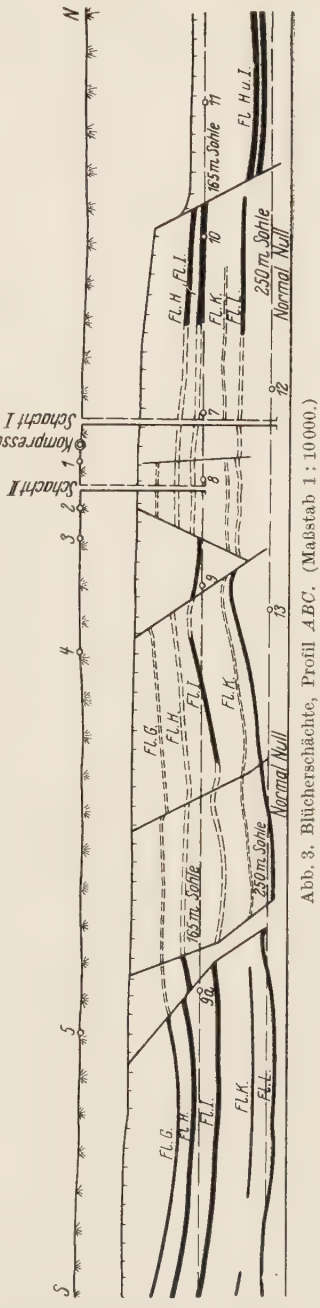


Abb. 3. Blücherschächte, Profil *ABC*. (Maßstab 1 : 10000.)

Die Erbauerfirmen, die Linke-Hofmann-Busch-Werke in Breslau und die Borsig-Werke in Berlin, hatten die große Freundlichkeit, mich mit den nötigen Unterlagen zu versehen, um die Massendruckdiagramme (Abb. 5 bis 11) ermitteln zu können, die ja, wie oben gezeigt, für die Form der auftretenden Schwingungen maßgebend sind. Das Zustandekommen dieser Diagramme aus dem Kräftespiel von Kolben, Kolbenstange, Kreuzkopf, Schubstange, Kurbel und Gegengewicht am Schubkurbelgetriebe wird in den Lehrbüchern der Mechanik (u. a. Föppl, Lorenz) eingehend erörtert: die horizontalen Massendrucke errechnen sich aus fünf, die vertikalen aus drei Gliedern.

Horizontale Massendrucke:

$$\text{Glied I} \quad \frac{P+G}{g} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos\alpha, \qquad \text{Glied II} \quad \frac{P+G}{g} \cdot \frac{r^2}{l} \cdot \cos 2\alpha \cdot \omega^2,$$

$$\text{Glied III} \quad -\frac{G}{g} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \frac{r \cdot \sigma}{l^2} \cdot \cos 2\alpha, \qquad \text{Glied IV} \quad \frac{K}{g} \cdot a \cdot \omega^2 \cdot \cos\alpha,$$

$$\text{Glied V} \quad \frac{V}{g} \cdot \varrho \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha + \pi);$$

Vertikale Massendrucke:

$$\text{Glied III} \quad \frac{G}{g} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \frac{\sigma}{l} \cdot \sin\alpha, \qquad \text{Glied IV} \quad \frac{K}{g} \cdot a \cdot \omega^2 \cdot \sin\alpha,$$

$$\text{Glied V} \quad \frac{V}{g} \cdot \varrho \cdot \omega^2 \cdot \sin(\alpha + \pi);$$

darin bedeutet:

P	kg Gew.	Summe aller Gewichte der hin- und hergehenden Teile (Kolben, Kolbenstangen, Kreuzkopf),
G	kg Gew.	Gewicht der Schubstange,
g	m/sec²	Erdbeschleunigung,
r	m	Kurbelradius (siehe Abb. 4),
ω	1/sec	Winkelgeschwindigkeit,
l	m	Länge der Schubstange,
α	Grad	Kurbelwinkel (siehe Abb. 4),
σ	m	Abstand des Schwerpunkts der Schubstange vom Kreuzkopf,
K	kg Gew.	Gewicht der Kurbel,
a	m	Abstand des Kurbelschwerpunkts von der Drehachse,
V	kg Gew.	Gewicht des Gegengewichts,
ϱ	m	Abstand des Schwerpunkts des Gegengewichts von der Drehachse.

Abb. 4. Schubkurbelgetriebe.

Da wir es hier mit zweiseitigen Verbundmaschinen zu tun haben, die mit einer Kurbelversetzung von 90° laufen, muß die Hoch- und Niederdruckseite jeder Maschine einzeln durchgerechnet und die sich ergebenden Diagramme unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung wiederum superponiert werden.

Der Gang der Rechnung sei an Hand des Beispiels des Niederdruckkompressors auf den Blücherschächten im einzelnen durchgeführt.

a) Berechnungsunterlagen (nach Angaben der Linke-Hofmann-Busch-Werke).

Gegenstand		Bezeichnung	Zahlenwert	Bem.
Gewicht der Kolben der Niederdr.-Seite von Dampfmaschine und Kompressor, einschließlich Kolbenstange und Kreuzkopf. Also:		P_N		
Dampf-Kolben	1065 kg			
+ Luftkolben	1215 kg			
+ Kolbenstange	1140 kg			
+ Kreuzkopf	880 kg			
Gesamt	4300 kg	P_N	4300 kg	Niederdruckseite
Dasselbe bei der Hochdruckseite, also:		P_H		
Dampfkolben	400 kg			
+ Luftkolben	480 kg			
+ Kolbenstange	1140 kg			
+ Kreuzkopf	880 kg			
Gesamt	2900 kg	P_H	2900 kg	Hochdruckseite

Berechnungsunterlagen (Fortsetzung).

Gegenstand	Bezeichnung	Zahlenwert	Bem.
Gewicht d. Schubstange	G	1580 kg	
Kurbelradius	r	0,60 m	
Winkelgeschwindigkeit d. Kurbel;	ω		
für $n = 75$ $(T = 0{,}8)$		7,85	$7{,}85^2 = 61{,}9$
für $n = 60$ $(T = 1{,}0)$		6,28	$6{,}28^2 = 39{,}5$
Länge der Schubstange	l	3,00 m	
Abstand des Schwerpunkts der Schubstange vom Kreuzkopf	σ	1,75 m	
Gewicht der Kurbel (einschl. Zapfen)	K	1450 kg	
Abstand des Kurbel-Schwerpunkts v. d. Drehachse	a	0,22 m	
Gewicht des Gegengewichts	V	1000 kg	
Abstand des Schwerpunkts des Gegengewichts von der Drehachse	ϱ	0,76 m	

b) Horizontale Massendrucke.

1. Hochdruckseite.

Die Massendrucke sind eine aus fünf Gliedern zusammengesetzte Funktion des Kurbelwinkels. Einsetzung in die auf S. 6 angegebene und hier wiederholte Formel ergibt folgende Werte:

α	I. Glied	II. Gied	III. Glied	IV. Glied	V. Glied	Superpos. aller Glieder
Grad	$\frac{P+G}{g}\cdot r\cdot\omega^2$ $\cdot\cos\alpha$ kg	$\frac{P+G}{g}\cdot\frac{r^2}{l}\cdot\omega^2$ $\cdot\cos 2\alpha$ kg	$-\frac{G}{g}\cdot r\cdot\omega^2\frac{r\cdot\sigma}{l^2}$ $\cdot\cos 2\alpha$ kg	$\frac{K}{g}\cdot a\cdot\omega^2$ $\cdot\cos\alpha$ kg	$\frac{V}{g}\cdot\varrho\cdot\omega^2$ $\cdot\cos(\alpha+\pi)$ kg	
0	+ 16950	+ 3380	− 698	+ 2015	− 4790	+ 16875
30	+ 14680	+ 1690	− 349	+ 1724	− 4150	+ 13595
60	+ 8475	− 1690	+ 349	+ 1007	− 2395	+ 5746
90	0	− 3380	+ 698	0	0	− 2682
120	− 8475	− 1690	+ 349	− 1007	+ 2395	− 8428
150	− 14680	+ 1690	− 349	− 1724	+ 4150	− 10913
180	− 16950	+ 3380	− 698	− 2015	+ 4790	− 11493

2. Niederdruckseite.

Entsprechend ergibt sich für die Niederdruckseite:

α	I. Glied	II. Glied	III. Glied	IV. Glied	V. Glied	Superpos.
0	+ 22270	+ 4450				+ 23247
30	+ 19300	+ 2225				+ 18750
60	+ 11135	− 2225				+ 7871
90	0	− 4450	Glied III—V siehe oben!			− 3752
120	− 11135	− 2225				− 11623
150	− 19300	+ 2225				− 14998
180	− 22270	+ 4450				− 15743

3. Superposition beider Seiten.

Bei der Superposition beider Seiten ist, wie oben bereits angedeutet, zu berücksichtigen, daß die Niederdruckseite um 90^0 voreilt. Der Massendruck bei der Kurbelstellung $\alpha = 0$ auf der Hochdruckseite entspricht also demjenigen der Stellung $\alpha = 90^0$ auf der Niederdruckseite usw.

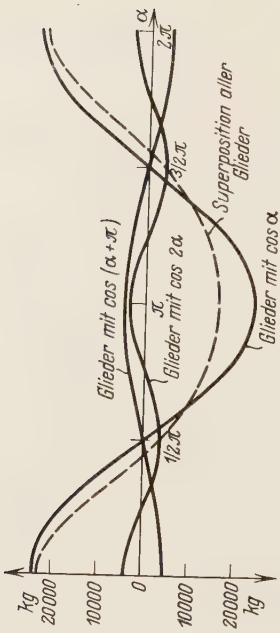


Abb. 6. Horizontale Massendrucke, Niederdruck-Kompressor, Niederdruckseite.

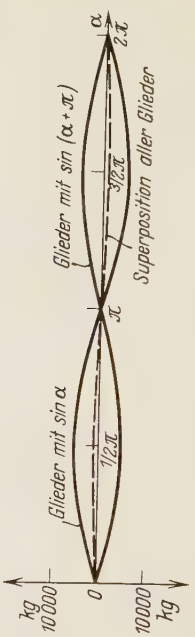


Abb. 8. Vertikale Massendrucke, Niederdruck-Kompressor, eine Seite.

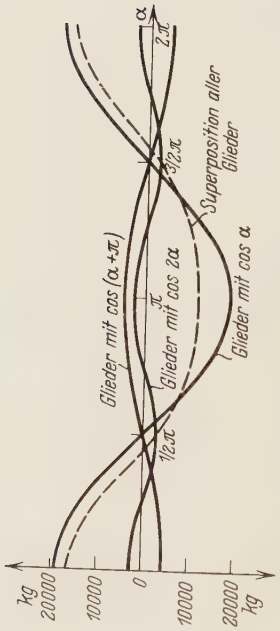


Abb. 5. Horizontale Massendrucke, Niederdruck-Kompressor, Hochdruckseite.

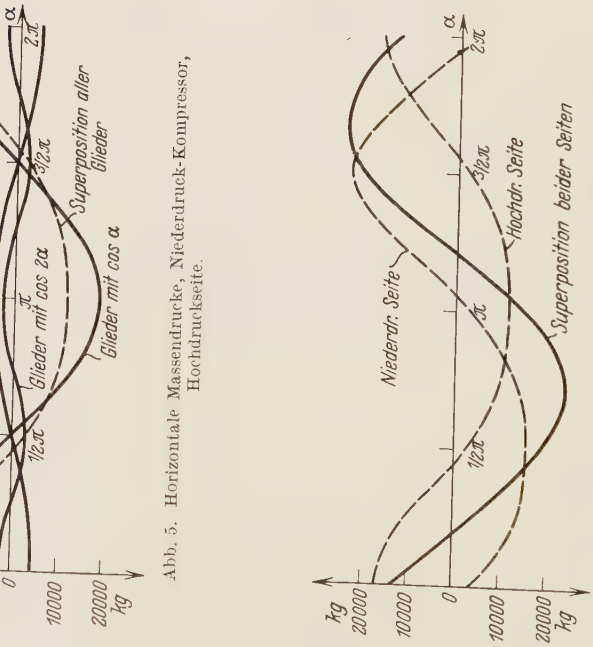


Abb. 7. Horizontale Massendrucke, Niederdruck-Kompressor, Superposition beider Seiten.

Algebraische Addition der in dieser Weise einander zugeordneten Werte ergibt, wenn mit α der Kurbelwinkel der Hochdruckseite bezeichnet wird:

α Grad	Ges. Massendruck kg	α Grad	Ges. Massendruck kg
0	+ 13123	210	— 3042
30	+ 1972	240	+ 10322
60	— 9222	270	+ 20565
90	— 18416	300	+ 24496
120	— 23426	330	+ 21466
150	— 22536	360	+ 13123
180	— 15245		

Die Ergebnisse der Berechnung der horizontalen Massendrucke des Niederdruckkompressors sind auf Abb. 5 bis 7 graphisch dargestellt.

c) Vertikale Massendrucke.

1. Eine Seite.

Da die vertikalen Massendrucke auf beiden Kompressorseiten gleich sind, brauchen sie nur für eine Seite errechnet zu werden. Einsetzung der oben genannten Werte in die entsprechenden Formeln ergibt:

α	III. Glied	IV. Glied	V. Glied	Superpos.
Grad	$\frac{G \cdot r}{g} \cdot \omega^2 \frac{\sigma}{l} \sin \alpha$ kg	$\frac{K}{g} a \cdot \omega^2 \sin \alpha$ kg	$\frac{V}{g} \cdot \varrho \cdot \omega^2 \cdot \sin(\alpha + \pi)$ kg	
0	0	0	0	0
30	1741	1008	— 2400	+ 349
60	3020	1741	— 4160	+ 601
90	3482	2016	— 4800	+ 698

2. Superposition beider Seiten.

Superponiert man entsprechend dem für die Berechnung der horizontalen Massendrucke gesagten, so ergibt sich:

α Grad	Ges. Massendruck kg	α Grad	Ges. Massendruck kg
0	+ 698	120	+ 252
30	+ 950	150	— 252
60	+ 950	180	— 698
90	+ 698		usw.

Die Ergebnisse der Berechnung der vertikalen Massendrucke sind auf Abb. 8 und 9 graphisch dargestellt.

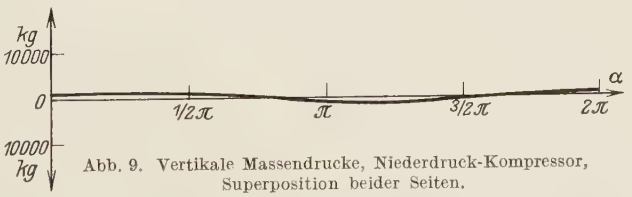


Abb. 9. Vertikale Massendrucke, Niederdruck-Kompressor, Superposition beider Seiten.

Ganz entsprechend wurden die beim Hochdruckkompressor auftretenden Massendrucke durchgerechnet. Als Resultat sind die Massendruckdiagramme dargestellt, wie sie sich aus der Superposition

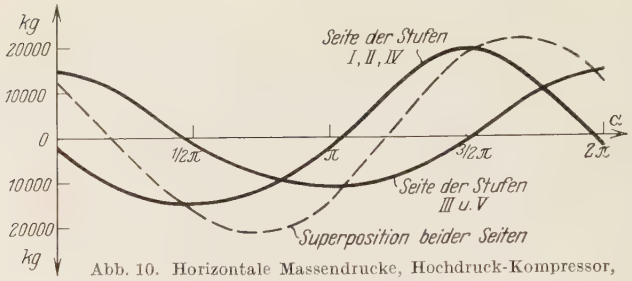


Abb. 10. Horizontale Massendrucke, Hochdruck-Kompressor, Superposition beider Seiten.

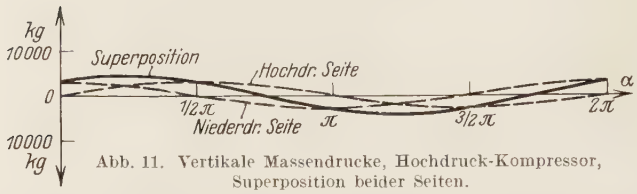


Abb. 11. Vertikale Massendrucke, Hochdruck-Kompressor, Superposition beider Seiten.

beider Seiten ergeben (Abb. 10 und 11). Bei Betrachtung dieser Superpositionen (Niederdruckmaschine: Abb. 7 und 9, Hochdruckmaschine: Abbildungen 10 und 11) sind zwei Tatsachen besonders augenfällig. Einmal die außerordentliche Ähnlichkeit, die die Massendruckdiagramme mit reinen Sinus - Grundschwingungen aufweisen, zweitens das vergleichsweise Zurücktreten der Vertikalmassendrucke. Beide Erscheinungen finden wir in den Seismogrammen mit großer Deutlichkeit bestätigt: Abb. 32 und 33 sind Photographien der Original-Seismogramme 8 und 9, die in 170 bzw. 160 m Entfernung von den Maschinen aufgenommen wurden. Seismogramm 8 (Abb. 32) zeigt die durch die Niederdruckmaschine, Seismogramm 9 (Abb. 33) die durch die Hochdruckmaschine erregten Bodenschwingungen, beide zeigen fast reine Sinusform in den Horizontalkomponenten, während die Vertikalbewegungen gar nicht bzw. sehr schwach aufgezeichnet sind.

2. Delbrückschächte.

Waren es die verhältnismäßig einfachen und klaren Versuchsverhältnisse, die mir ein Arbeiten auf den Blücherschächten Erfolg versprechend erscheinen ließen, so lag der Hauptanreiz zu einer Untersuchung auf den Delbrückschächten in der gewaltigen Schwingungsenergie, die von der dortigen Gaszentrale ausgeht. Vier Großgasmaschinen mit einer Gesamtleistung von ca. 7400 PS sind dort in dauerndem Betrieb, sie setzen den Zechenplatz und das umliegende Gelände im Umkreis von mehreren hundert Metern in deutlich fühlbare Schwingungen, die sich im Betriebe lästig bemerkbar machen: freistehende Mauern von Neubauten müssen sorgfältig abgestützt werden, um sie vor dem Einstürzen zu bewahren. Die Bewegungen der Fundamente selbst sind deutlich sichtbar.

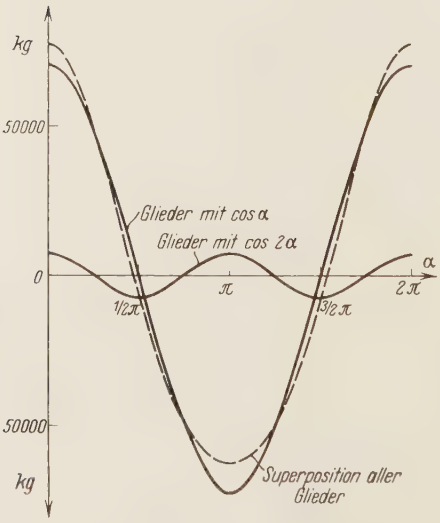


Abb. 12. Horizontale Massendrucke, Gasmaschine Typ T-10, Delbrückschächte.

Im einzelnen handelt es sich um je zwei Tandem-Viertaktmaschinen vom Typ T-12a bzw. T-10 der Firma Ehrhardt & Sehmer (Saarbrücken). Die Maschinen

vom Typ T-12a leisten je 2700 PS bei einem Hub von 1200 mm, 1150 mm Zylinderdurchmesser und $n = 107$ Touren/Min. Sie sind mit je einem Drehstrom-Schwung-

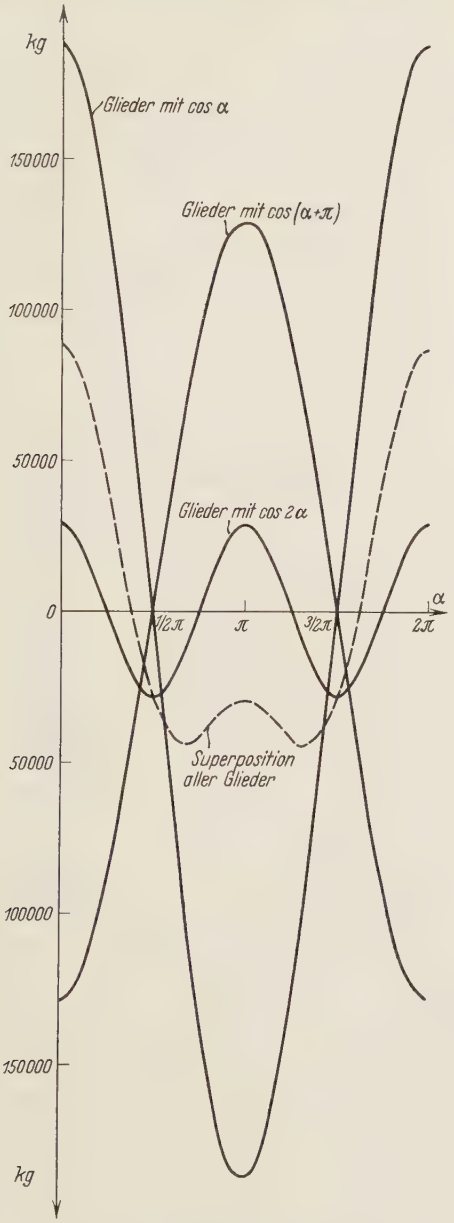


Abb. 14. Horizontale Massendrucke, Gasmaschine Typ T-12a, Delbrückschächte.

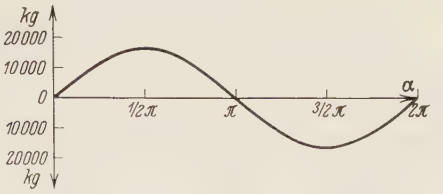


Abb. 13. Vertikale Massendrucke, Gasmaschine Typ T-10, Delbrückschächte.

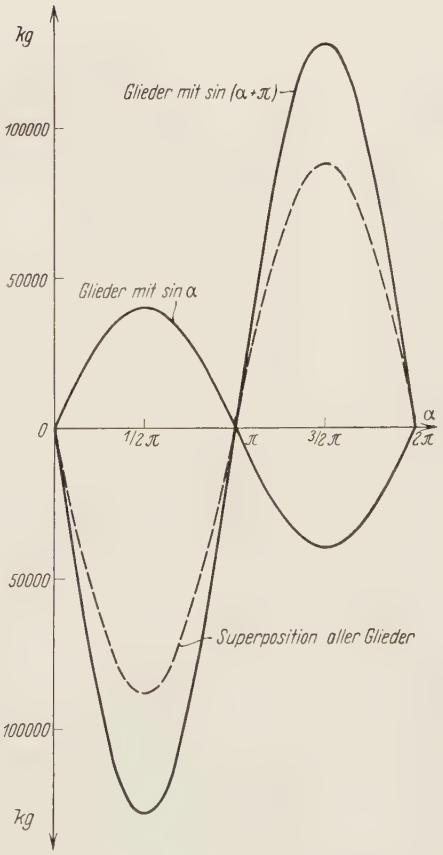


Abb. 15. Vertikale Massendrucke, Gasmaschine Typ T-12a, Delbrückschächte.

rad-Innenpol-Generator von 2500 kVA Leistung und 50 Perioden gekuppelt. Bei den Maschinen vom Typ T-10 beträgt die Leistung 1000 PS, der Hub 1000 mm, der Zylinderdurchmesser 850 mm und die Tourenzahl 107/Min. Die Generatoren arbeiten auf dasselbe Netz wie die oben erwähnten, ihre Leistung beträgt 1100 kVA.

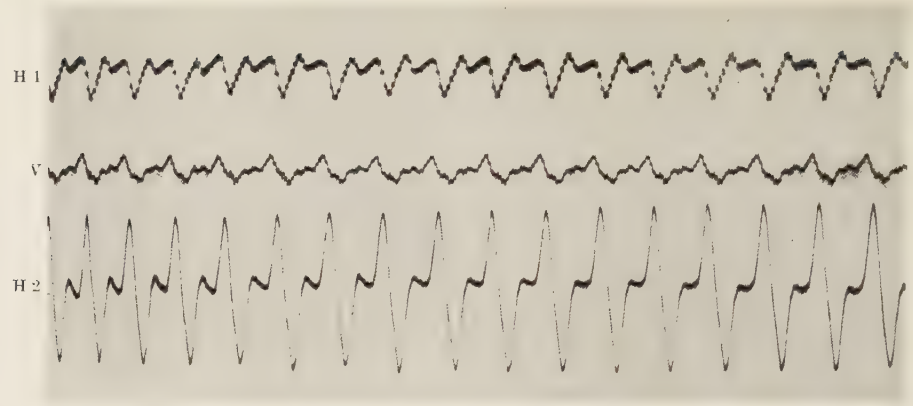


Abb. 16. Seismogramm 50 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergrößerung ca. 500fach. Stand 14, über Tage, 60 m östl. der Gaszentrale, Delbrückschächte.

Abb. 17. Lageplan der Delbrückschächte. Maßstab 1 : 24000.

Sämtliche Maschinen sind in der Halle parallel montiert, und zwar liegen die Gleitbahnen in der Nord-Süd Richtung. Die beiden Maschinen vom Typ T-10 stehen am weitesten westlich und werden mit Nr. 1 und 2 bezeichnet; dann folgt

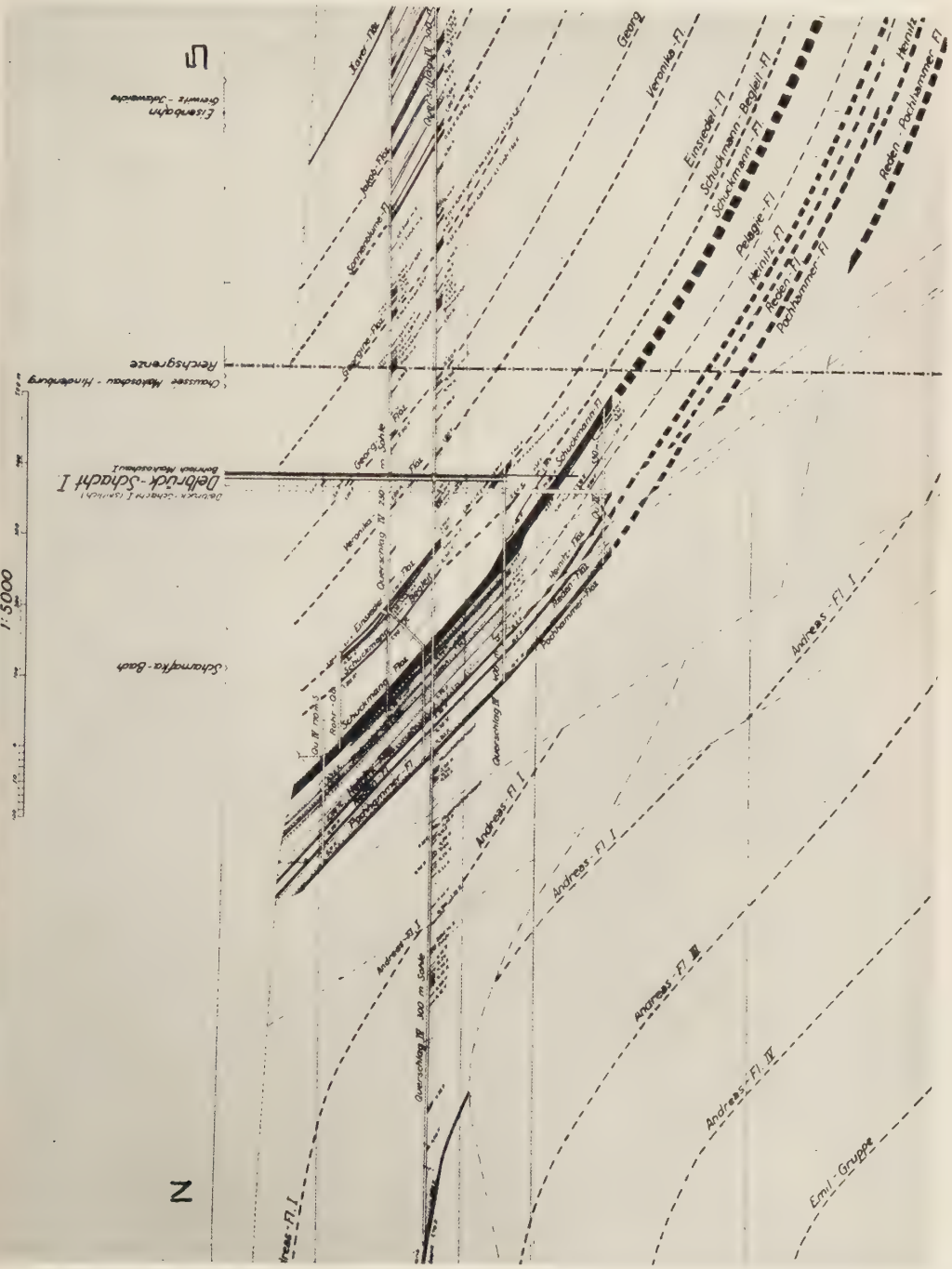


Abb. 18. Profil durch den Querschlag IV der Delbrückschächte. Maßstab 1:10000. (Halbe Größe der Originalzeichnung.)

eine Dampfturbine und die Maschinen vom Typ T-12a, die die Nummern 4 und 5 tragen. Mit Rücksicht auf die schon erwähnten, sehr erheblichen Bodenschwingungen fährt man je zwei Maschinen vom selben Typ mit 180° Phasenverschiebung, so daß also ein Kreuzkopf die nördlichste Stellung zur selben Zeit einnimmt, wie der andere die südlichste.

Nachdem mir die Firma Ehrhardt & Sehmer die notwendigen Daten entgegenkommenderweise zur Verfügung stellte, rechnete ich in der oben angegebenen Weise die Massendruckverhältnisse durch; Abb. 12 bis 15 zeigen die resultierenden Diagramme.

Ein Vergleich mit den Kompressordiagrammen (siehe Abb. 7, 9, 10, 11) zeigt einmal das etwa vierfache Ausmaß der freien Massendrucke bei den Gasmaschinen, dann aber auch, besonders Abb. 14, das deutliche Auftreten einer Oberschwingung. Die vertikalen Massendrucke sind ebenfalls sehr stark. Dementsprechend sind auch die Bodenbewegungen und damit die seismischen Aufzeichnungen ganz anderen Charakters: Abb. 16 zeigt Seismogramm 50, das in 60 m Entfernung einer Maschine vom Typ T 12a aufgenommen wurde, zu einem Zeitpunkt, als es die Sonntagsruhe ermöglichte, die anderen Maschinen für kurze Zeit stillzulegen.

Die geographische Lage der Delbrückschächte ist auf dem Lageplan (Abb. 17) ersichtlich, ihre geologischen Verhältnisse gehen aus dem Profil Abb. 18 hervor, auch hier finden wir eine mächtige tertiäre Überlagerung, das Karbon ist bis zu 530 m Teufe aufgeschlossen, was in Verbindung mit der kräftigen Schwingungsenergie der Gasmaschinen eine sehr willkommene Gelegenheit bot, die Ausbreitung nach der Teufe zu studieren.

Das Aufnahmegerät, seine Wirkungsweise und Abänderung für die vorliegende Aufgabe.

Das Aufnahmegerät, wie bereits oben erwähnt, ein Dreikomponenteninstrument nach Mintrop, ist in der Literatur (Mintrop[1 u. 9], Heinrich[2] u. a.) schon wiederholt eingehend beschrieben worden, so daß ich mich hier auf einen ganz kurzen Hinweis auf seine Wirkungsweise beschränken kann. Abb. 19 zeigt die drei Apparate, die auf einer gemeinsamen Grundplatte montiert sind. Die beiden Horizontalseismographen H_1 und H_2 sind gleicher Bauart: Eine Masse M ist durch Kreuzfedern KF in labilem Gleichgewicht gelagert und durch den Messingarm A mit dem Zeiger Z vermöge eines zweiten Kreuzfederpaares elastisch und reibungsfrei verbunden. Der kurze Hebelarm des Zeigers Z ist durch ein federndes Säulchen S gestützt, der lange Hebelarm betätigt das Spielgehänge Sp, indem er ein starres Säulchen Sn trägt, das an einem Hebelchen H angreift, das den Spiegel Sp trägt, über dem eine Linse angeordnet ist. Die Dämpfung des Systems wird erreicht, indem mit dem Messingarm B durch eine kleine Kolbenstange ein Kolben K verbunden ist, der in dem ölgefüllten Zylinder C spielt. Tritt nun eine Bodenbewegung auf, so wird die Masse M vermöge ihrer Trägheit

[9] Mintrop, L.: Die Erdbebenstation der Westf. Berggewerkschaftskasse in Bochum. Glückauf **1909**, Nr. 11 u. 12. Siehe auch Galitzin, Fürst Boris: Vorlesungen über Seismometrie, Petersburg 1913. (Deutsch von O. Hecker, Leipzig 1914.)

in Ruhe verharren, relativ zu ihrer Lagerung also eine Bewegung ausführen, die sich durch das genannte Hebelsystem dem Spiegelchen mitteilt. Diese Übertragung geschieht annähernd reibungslos, da alle Verbindungen in sinnreicher Weise durch Kreuzfederpaare oder Stahlspitzen auf Achatlagern (Säulchen *Sn* und Spiegelgehänge) angeordnet sind.

Ganz entsprechend ist das Vertikalinstrument *V* konstruiert (siehe auch Abb. 22), nur daß hier die Masse und ihr Kreuzfederlager in einer horizontalen Ebene liegen und das Gleichgewicht der Kräfte durch eine Spiralfeder *SF* hergestellt ist. Außerdem ist der Dämpfungskolben hier nicht hinter, sondern unter der Masse angebracht.

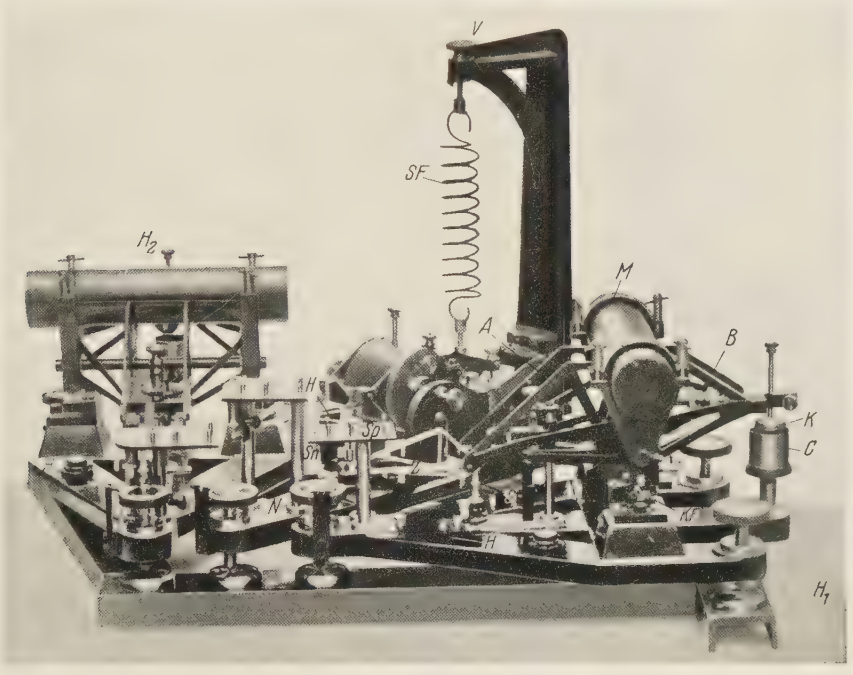


Abb. 19. Dreikomponenteninstrument (nach Mintrop).

Auf die Spiegelchen wird dann von einer gemeinsamen Lichtquelle in dem Lichtschreiber *L* (Abb. 20) ein Strahl geworfen, der wird reflektiert und, durch ein System von Linse und Zylinderlinse auf einen Punkt konzentriert, auf vorbeibewegtem photographischen Papier festgehalten, wobei die Auf- und Abbewegungen zu einer Kurve gestreckt werden. Die Zeitmarkierung wird erreicht, indem ein Chronometer (*Chr*) ein Lämpchen in Sekundenabständen aufblitzen läßt, was dann ebenfalls photographisch festgehalten wird. Als Kraftquelle dient ein 6-Volt-Akkumulator (*A*). Das ganze Aggregat ist in Abb. 20 in betriebsfertiger Aufstellung gezeigt, zur Erläuterung der Größenverhältnisse sei erwähnt, daß der Abstand vom Spiegelchen bis zum Papier etwa 1 m beträgt.

Um nun aus den Aufzeichnungen des Seismographen einen Rückschluß auf die wahre Bodenbewegung ziehen zu können, ist die Kenntnis der erreichten Ver-

größerung unerläßlich; ihre Ermittlung nach den Regeln der Erdbebenkunde[10, 11] ist im folgenden kurz angedeutet. Es gilt für die Horizontalinstrumente

$$J = \frac{a}{i} \cdot \varrho, \qquad E = \frac{a}{i}, \qquad J = E \cdot \varrho,$$

worin:

- J Indikatorlänge,
- a am Indikator gemessener Ausschlag,
- i Neigung des Instruments (in Sekunden gemessen),
- ϱ Umwandlungszahl von Grad- in Bogenmaß,
- E Neigungsempfindlichkeit.

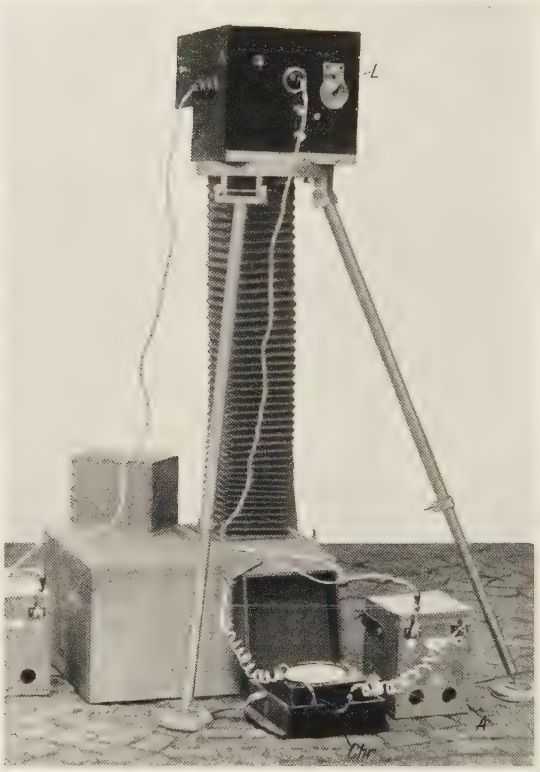


Abb. 20. Dreikomponenteninstrument (nach Mintrop).

Die Indikatorlänge J des Horizontalinstruments kann also experimentell aus der Neigungsempfindlichkeit E bestimmt werden, indem man die Neigungsschraube N (siehe Abb. 19) betätigt und den dadurch erreichten Ausschlag am Indikator mißt. Für das von mir benutzte Instrument beträgt die Ganghöhe h der Neigungsschraube 0,5 mm, ihr Abstand a zu der gedachten Verbindungslinie der beiden anderen Fußschrauben 29 mm, so daß sich bei voller Umdrehung der Schraube aus der Beziehung

$$\operatorname{tg} i = \frac{h}{a}$$

eine Neigung von 356″ ergibt. Da man im allgemeinen bedeutend geringere Neigungen verwendet, ist das Handrad der Neigungsschraube am Umfang in 50 Skalenteile eingeteilt.

Für das Vertikalinstrument gilt

$$J = \frac{G}{g} \cdot a,$$

worin:

- G Gesamtgewicht der schwingenden Massen, bezogen auf den Massenmittelpunkt,
- g Gewicht einer aufgelegten Zusatzmasse,
- a am Indikator gemessener Ausschlag.

Zur experimentellen Bestimmung der Indikatorlänge ermittelte ich G durch Wägung zu 1536 g, und verwandte als Zusatzmasse eine Schreibfeder von 0,47 g Gewicht.

[10] Sieberg, A.: Erdbebenkunde. Jena 1923.

[11] Wiechert, E.: Theorie der automatischen Seismographen. Abh. der kgl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathem.-physik. Kl. 1903.

Für die Indikatorvergrößerung gilt:

$$V = \frac{J}{L},$$

worin:

V Indikatorvergrößerung,
J Indikatorlänge,
L Äquivalente Pendellänge.

Die äquivalente Pendellänge errechnet sich aus der bekannten Formel für die Schwingungsdauer des mathematischen Pendels:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \text{oder} \quad l = \frac{T^2 \cdot g}{4\pi^2},$$

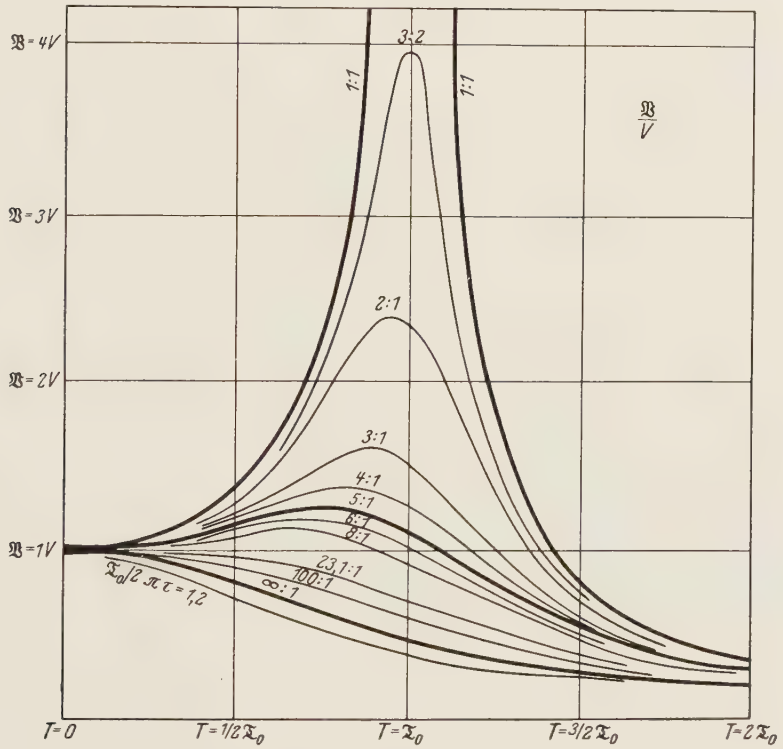


Abb. 21. Graphische Darstellung zur Ermittlung der „wahren Vergrößerung" von Seismometern (nach Wiechert: a. a. O., S. 81).

darin bedeutet:

l Länge des mathematischen Pendels,
T Schwingungsdauer des mathematischen Pendels,
g Erdbeschleunigung.

Bezeichnen wir nun die Eigenschwingungsdauer unseres Pendels mit T_0 und die Länge des unserem äquivalenten Pendels mit L, dann ergibt sich, wenn wir g

gegen π^2 kürzen,

$$L = \frac{T_0^2}{4}.$$

Die Eigenschwingungsdauer T_0 des ungedämpften Pendels ermittelte ich durch Auszählen und Abstoppen von 50 Schwingungen.

Für sehr rasche Bodenbewegungen, deren Periode T im Vergleich zu der Eigenschwingungsdauer T_0 verschwindend gering ist, kann man die oben genannte Indikatorvergrößerung direkt in Rechnung setzen, da die träge Masse dann in völliger Ruhe verharrt. Wächst das Verhältnis $\frac{T}{T_0}$ aber über 0,15 heraus, dann spielt es im Verein mit der angewandten Dämpfung eine bedeutende Rolle für die Bestimmung der wahren Vergrößerung $\mathfrak{V}$. Wiechert[11] hat die Verhältnisse im einzelnen durchgerechnet und fand

$$\mathfrak{V} = \frac{V}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right]^2 + 4\frac{(\ln \varepsilon)^2}{\pi^2 + (\ln \varepsilon)^2}\left(\frac{T}{T_0}\right)^2}},$$

ein Abhängigkeitsverhältnis, das er auch graphisch darstellte (Abbildung 21).

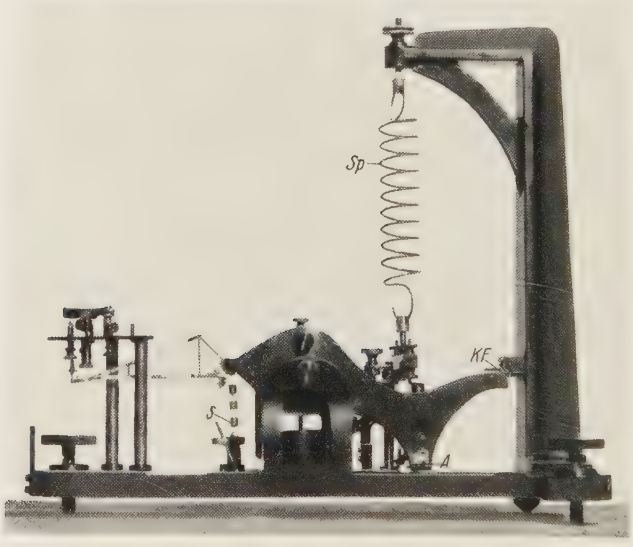


Abb. 22. Vertikalkomponente des Instruments.

Die Betrachtung des Schaubildes lehrt, daß man es vor allem vermeiden muß, für die Proportion $\frac{T}{T_0}$ einen Wert in der Nähe von 1 zu erhalten, den Fall des „Mitschwingens" oder der „Resonanz", bei dem schon geringe Fehler in der Bestimmung von Dämpfung oder Periode ganz außerordentlich nachteilige Folgen für die Genauigkeit des Ergebnisses haben. Das Diagramm lehrt weiter, daß man sich tunlichst links von diesem Scheitelwert halten soll: $\frac{T}{T_0}$ ist kleiner als 1 zu wählen, damit die wahre Vergrößerung nicht unter die Indikatorvergrößerung V sinkt.

Aus diesen Überlegungen ergab sich in dem vorliegenden Fall die Notwendigkeit, die Eigenperioden der Instrumente zu vergrößern. Das wurde im Fall der Horizontalinstrumente durch Schwächung der Blattfedern des Säulchens S erreicht. Im Falle des Vertikalinstruments wurde außerdem noch der Angriffspunkt A der Spiralfeder Sp in Richtung auf das Kreuzfedergelenk KF (siehe Abb. 22) zurückverlegt.

Die bei den verschiedenen hier untersuchten Maschinen auftretenden Stö-

rungsperioden, die Eigenperioden der Instrumente und die Periodenverhältnisse sind in der folgenden Zahlentafel zusammengestellt:

Maschine	Störungsperiode sec	Eigenperioden T_0			Per.-Verhältnis $T:T_0$		
		H 1 sec	H 2 sec	V sec	H 1	H 2	V
Gasmasch. Delbrückschächte . . .	0,56	1,04	0,85	0,82	0,54	0,66	0,68
Niederdr.-Kompr. Blücherschächte	0,80	1,04	0,85	0,82	0,77	0,94	0,98
Hochdr.-Kompr. Blücherschächte .	0,49	1,04	0,85	0,82	0,47	0,58	0,60

Für die Gasmaschinen auf den Delbrückschächten und den Hochdruckkompressor auf den Blücherschächten waren die oben erhobenen Forderungen betreffs der Eigenperioden also erfüllt. Ungünstiger liegen die Verhältnisse für die Beobachtungen der Niederdruckmaschine auf der Blücher-Grube, denen dementsprechend geringeres Gewicht beigelegt wurde.

Schon während der vorbereitenden Messungen im Institut für Markscheidekunde und Geophysik der Technischen Hochschule Breslau bemerkte ich, daß von den zur Ermittlung der wahren Vergrößerung $\mathfrak{V}$ notwendigen Daten die Neigungsempfindlichkeit und die Dämpfung je nach der Einjustierung des Instruments und der jeweiligen Temperatur gewissen Schwankungen unterworfen sind. Ich nahm daher fast täglich eine Bestimmung der Neigungsempfindlichkeit vor, die Dämpfung wurde bei jeder einzelnen Registrierung untersucht.

Die Messungen im Gelände.

1. Blücherschächte.

Auf den Blücherschächten bei Rybnik ergab sich die Versuchsanordnung in einfachster Weise aus den örtlichen und geologischen Verhältnissen (Abb. 3 und Tafel I): ich hatte mich mit meinen Beobachtungen an die Profillinie ABC zu halten, die über und unter Tage leicht zugängig ist, besonders nach Süden zu, wohin sich der Bergbau in neuerer Zeit wesentlich erstreckt.

Ich ging zunächst von dem Niederdruckkompressor aus und beobachtete auf Stand 2 in 100 m Entfernung über Tage. Die Maschine lief mit ihrer normalen Tourenzahl von $n = 60$/Min., während der Hochdruckkompressor stillstand, der sonstige Tagesbetrieb aber umging. Das Ergebnis liegt in Seismogramm 1 (Abb. 23) vor: die Bodenunruhe durch den allgemeinen Tagesbetrieb (Fördermaschinen, Aufbereitung und Separation, Sägewerk usw.) erwies sich als ein erheblicher Störungsfaktor. Während einer Betriebspause nahm ich dann Seismogramm 2 (siehe Abb. 24) an derselben Stelle auf, der Niederdruckkompressor lief wieder mit $n = 60$ Touren. Das in der Gleitbahnebene schwingende Horizontalinstrument (*H 1*) zeichnet nun eine einigermaßen reine Schwingung auf, in Anbetracht der verhältnismäßig geringen Entfernung und der angewandten Vergrößerung von $\mathfrak{V} = 3642$fach erscheint die Amplitude jedoch gering. Ich setzte nun in den ruhigen Nachtstunden, die ich in der ganzen Folgezeit zur Durchführung meiner Beobachtungen bevorzugte, auf Stand 3, 170 m südlich von der Maschine auf und ließ wieder mit der normalen Tourenzahl von $n = 60$/Min. fahren. Das resultierende Seismogramm zeigte einwandfrei, daß die Bodenbewegungen durch die

Niederdruckmaschine bei normalem Betrieb nur in allernächster Nähe registrierbare Größenordnung aufweisen.

Das besondere Entgegenkommen der Werksleitung ermöglichte es mir dann jedoch, die Maschine für die zwei Minuten der Beobachtung versuchsweise mit

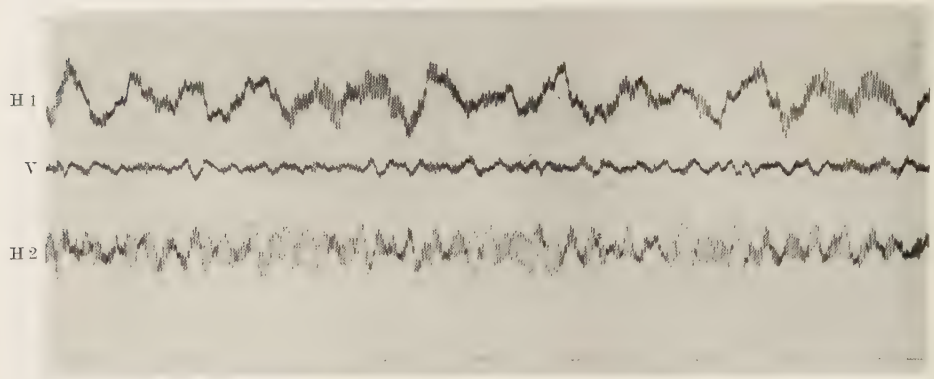


Abb. 23. Seismogramm 1 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergrößerung ca. 3000fach. Stand 2, 100 m südlich der Niederdruckmaschine, Blücherschächte. Aufgenommen während der Hauptbetriebszeit.

$n = 75$/Min. Tourenzahl fahren zu lassen, das Ergebnis (Seismogramm 8, Abb. 32) befriedigte vollauf, ein Vergleich von Seismogramm 7 und 8, die beide auf Stand 3[12] aufgenommen wurden, zeigte deutlich, daß nunmehr der Schwellenwert überschritten war, der zur klaren Aufzeichnung der Schwingungen mit dem

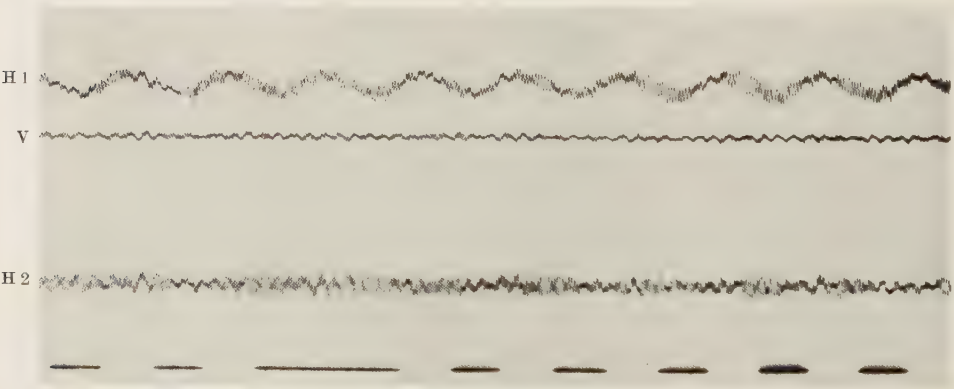


Abb. 24. Seismogramm 2 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergrößerung ca. 3000fach. Stand 2, 100 m südlich der Niederdruckmaschine, Blücherschächte. Aufgenommen während der Mittagspause.

benutzten Instrument und unter den gegebenen Verhältnissen (allgemeine Unruhe) erforderlich ist. Abb. 25 von Seismogramm 25 zeigt den Abschnitt aus dem Anfahren der Niederdruckmaschine, in dem dieser Schwellenwert überschritten wird; er liegt etwa bei $n = 64$ Touren/Min. oder $T = 0{,}94$ sec.

Der Hochdruckkompressor dient zur Speisung der Druckluftlokomotiven unter Tage, ist also nur in Betrieb, wenn die Streckenförderung umgeht.

[12] Siehe Tafel I.

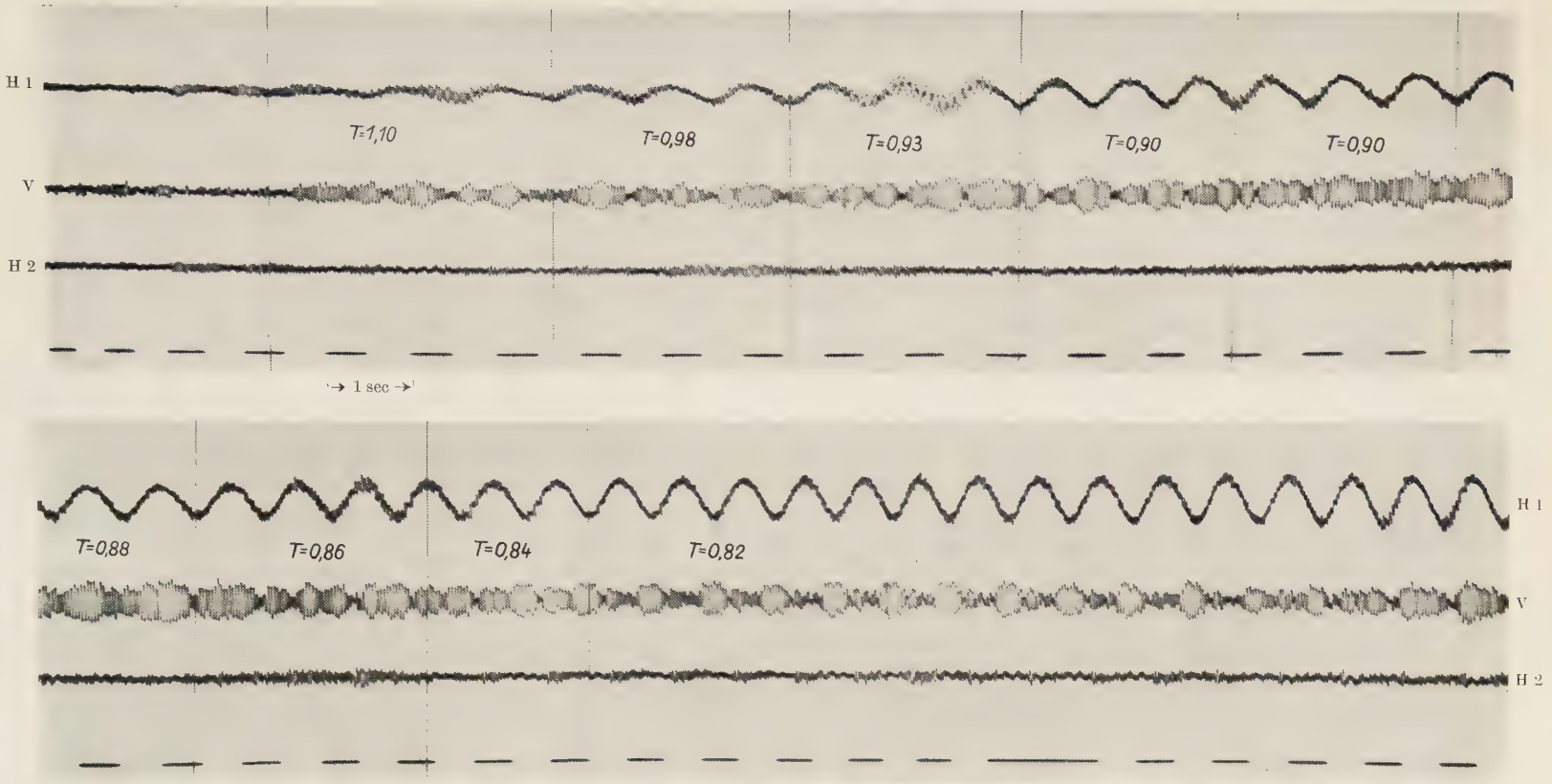


Abb. 25. Seismogramm 25 (4 Zehntel der Größe des Originals). Indikatorvergrößerung ca. 3000fach. Stand 2,100 m südlich der Niederdruckmaschine, Blücherschächte
Das Diagramm zeigt das Anfahren der Maschine.

Die Luftkessel sind jedoch so dimensioniert, daß die Maschine auch ohne jegliche Entnahme für wenige Minuten auf Vorrat arbeiten kann; dieser Umstand ermöglichte es mir, auch den Hochdruckkompressor zu den ruhigen Nachtstunden eigens zu meinen Zwecken in Betrieb nehmen lassen und beobachten zu können. Das erste Versuchsergebnis, ebenfalls auf Stand 3 aufgenommen, liegt in Seismogramm 9 (Abb. 33) vor, es zeigte, daß bei einer Tourenzahl von $n = 122$ Touren/Min. auch vom Hochdruckkompressor deutlich registrierbare Schwingungen ausgehen.

Aus diesen Vorversuchen resultierten die Grundsätze für die technische Durchführung der Messungen auf den Blücherschächten, die wie folgt zusammengefaßt werden können:

1. Die Beobachtungen waren tunlichst in den betriebsruhigen Nachtstunden vorzunehmen.

2. Das Instrument wurde grundsätzlich so aufgebaut, daß einer der Horizontal-Seismographen in Richtung der Gleitbahn schwingen konnte, die erfahrungsgemäß der Hauptschwingungsrichtung nahekommt.

3. Nach dem Aufsetzen des Instruments, das bei der dazu erforderlichen großen Sorgfalt etwa eine Stunde Zeit in Anspruch nahm, wurde dem Maschinenführer telephonisch oder durch Boten eine Zeit angegeben, zu der die Niederdruckmaschine mit $n = 75$ Touren/Min. zu fahren war. Genau zehn Minuten später hatte die Hochdruckmaschine mit $n = 122$ Touren/Min. zu laufen, sie wurde mit derselben Aufstellung des Instruments registriert.

4. Für jede einzelne Aufstellung wurde ein Dämpfungsdiagramm aufgenommen, die Neigungsempfindlichkeit und Eigenperiode des Instruments wurden häufig geprüft.

In dieser Weise wurde längs der Profillinie *ABC* (siehe Tafel I) auf sechs Beobachtungspunkten gearbeitet; die örtlichen Verhältnisse jedes einzelnen „Standes", ihre Entfernung von den Maschinen und die resultierenden Diagramme sind im folgenden tabellarisch zusammengestellt.

Blücherschächte, Punkte über Tage.

Nr.	Stand, Beschreibung	Bodenverhältnisse	Entfernung v. d. Niederdruck-Masch. m	Entfernung v. d. Hochdr.-Masch. m	Seism. Nr.
1	Hauptmaschinengebäude.	Betonboden d. Kellers	23	11	3, 4, 31, 32
2	Ventilatorenhaus	Betonfußboden . . .	100	90	1, 2, 5, 25, 26
3	Autogarage.	Betonfußboden	170	160	6, 7, 8, 9
4	Pumpenhaus	Aufgeschüttete Halde .	350	340	10, 11
5	Offenes Gelände	Mutterboden	830	820	21, 22
6	Offenes Gelände	Mutterboden	1630	1620	23, 24

Von den genannten Seismogrammen sind in dieser Arbeit die Diagramme Nr. 1, 2, 8, 9, 25 auf S. 20, 34, 35, 21 abgebildet[13]. Auf die Auswertung komme ich weiter unten zurück. Hier sei nur kurz darauf hingewiesen, daß auch auf Stand 6, also in über 1½ km Entfernung von den Maschinen, noch Schwingungsweiten von etwa 2 mm entsprechend einer Bodenbewegung von etwa 300 mμ gemessen wurden.

[13] Die sämtlichen Originalseismogramme und Dämpfungskurven sind im Institut für Markscheidekunde und Geophysik der Technischen Hochschule zu Breslau.

Die Messungen unter Tage wurden ganz entsprechend denen über Tage durchgeführt, das Instrument ließ sich bequem in einem Förderwagen transportieren. Mein Bestreben war einmal, auf beiden Sohlen möglichst senkrecht unter dem Hauptmaschinengebäude zu beobachten, wofür Stand 7 und 12 (siehe Hauptgrundriß, Tafel I) gewählt wurden, ferner folgte ich auch unter Tage der Profillinie *A BC*, wobei als größte söhlige Entfernung 730 m gewählt wurde. Außerdem versuchte ich, dicht genug an das Störungsgebiet im Norden des Feldes (siehe Profil *A BC*, Abb. 3) zu kommen, um dessen Einfluß auf die Amplitude der Bodenbewegungen zu erfassen, doch waren die Strecken, die in das Gebiet führen, teils zugedämmt, teils verbrochen, so daß Stand 11 der nördlichste blieb mit 550 m söhliger Entfernung vom Hauptmaschinengebäude.

Auf der 250 m Sohle habe ich mich auf zwei Beobachtungspunkte beschränkt, der außerordentlich geringen Amplituden wegen. Die Beobachtungspunkte unter Tage liegen sämtlich in den Förderstrecken, als Untergrund hatte ich also in jedem Falle die feinen, lockeren Bergemassen, wie man sie als Unterlage für das Gestänge findet.

Eine tabellarische Zusammenstellung der Beobachtungspunkte ergibt folgendes Bild:

Blücherschächte, Punkte unter Tage.

Stand	Seiger-Teufe	Orts-bezeichnung	Söhl. Entf.		Schräge Entf.		Seism.	Dämpf. Kurve
			N.-D.	H. D.	N.-D.	H.-D.		
Nr.	m		m	m	m	m	Nr.	D Nr.
7	165	Haupt-Querschl.	50	50	170	170	12, 14 13, 15	5, 6
8	165	Richtstr. Flöz I	150	140	220	220	16 17	7
9	165	Richtstr. Flöz I	250		300		18	8
9A	165	Richtstr. Flöz L	740	730	760	750	19 20	9
10	165	Richtstr. Flöz L	375		410		34	17
11	165	Richtstr. Flöz L	550		570		33	16
12	250	Haupt-Querschl.	90	100	270	270	27 28	13
13	250	Richtstr. Flöz L	240		350		29	14

Von den genannten Seismogrammen sind die Diagramme Nr. 14 und 15 auf S. 34 und 35 dieser Arbeit abgebildet. Von einer Wiedergabe der Dämpfungskurven ist abgesehen worden.

Die Messungen auf den Blücherschächten wurden in der Zeit vom 31. August bis zum 14. September 1930 durchgeführt.

2. Delbrückschächte.

Für die seismischen Beobachtungen auf den Delbrückschächten wäre es ideal gewesen, ähnlich wie auf der Blüchergrube immer nur ein und dieselbe Maschine als Energiequelle zu benutzen, eine Möglichkeit, die leider nicht gegeben

war, da sämtliche Maschinen im allgemeinen Tag und Nacht hindurch in Betrieb waren, auch an Sonn- und Feiertagen wurde der Betrieb einzelner Maschinen lediglich zu Reparaturzwecken oder aus Mangel an Koksgas gelegentlich unterbrochen. Ich war daher gezwungen, das Gesamtaggregat der vier Maschinen als Energiequelle zu benutzen. Dabei kam mir die oben erwähnte parallele Anordnung und der Umstand zustatten, daß die Maschinen auf dasselbe Netz arbeiten, also schon aus elektromotorischen Gründen „Takt halten", sodaß die Bodenschwingungen frei von Schwebungen sind, wie sie beim gleichzeitigen Betrieb mehrerer Maschinen verschiedener Tourenzahl auftreten. Die Messungen stellte ich grundsätzlich zu Zeitpunkten an, in denen alle vier Maschinen liefen. In einzelnen Fällen, bei Reparaturen oder Mangel an Koksgas, fiel die eine oder andere Maschine aus.

Die Beobachtungspunkte über und unter Tage wählte ich nach Möglichkeit längs einem streichenden und einem querschlägigen Profil (*A BC* und *XYZ* im Hauptgrundriß Tafel II, Punkte über Tage siehe auch Lageplan Abb. 17). Die unglückliche Grenzziehung gegen Polen hinderte mich, die Profile südlich der Anlage fortzusetzen. Im folgenden sind die Beobachtungspunkte tabellarisch zusammengestellt.

Delbrückschächte, Punkte über Tage.

Stand	Auf Profil	Beschreibung und Untergrund	Entfernung m	Seism. Nr.	Dämpf.-Kurve *D* Nr.
14	*ABC*	Materialschuppen, Betonfußboden .	60	40, 49—53	26
15	*ABC*	Offenes Gelände, Mutterboden . .	410	67—70A	38—40
16	*ABC*	Pumpenraum, Betonfußboden . . .	790	41	20
17	*ABC*	Wächterhaus am Versatzbohrloch, Betonsockel	1530	42	21
18	*ABC*	Offenes Gelände, Gew. Boden . . .	2240	44	22
19	*XYZ*	Offenes Gelände, Gew. Boden . . .	360	71—73	41, 42
20	*XYZ*	Offenes Gelände, Gew. Boden . . .	1000	65	37
21	*XYZ*	Offenes Gelände, Gew. Boden . . .	1720	66	37A

Von den genannten Seismogrammen sind in dieser Arbeit die Diagramme 40, 50 bis 52, 65, 67 bis 70 auf S. 28, 12 und 27, 39, 40 abgebildet.

Delbrückschächte, Punkte unter Tage.

Stand Nr.	Seiger-Teufe m	Profil	Ortsbezeichnung	Söhl. Entfg. m	Schräge Entfg. m	Seism. Nr.	Dämpf.-Kurve *D* Nr.
22	130	*XYZ*	Richtstr. Schuckmann-Begleit Flöz n. O.	250	280	47	25
23	230	*XYZ*	Mittelstrecke, Georgsflöz	190	300	46	24
24	230	*XYZ*	Hauptquerschl. n. N.	320	390	48	26
25	300	*XYZ*	Schuckmann Begl. Flöz n. O.	100	320	54	27
26	300	*XYZ*	Hauptquerschl., amPochhammer-Flöz	400	500	56	29
27	300	*XYZ*	Andreas Flöz	1020	1060	55	28
28	300	*ABC*	Querschl. III, südl. Schuckmann Begl. Flöz	360	470	58	30
29	300	*XYZ*	Querschl. IV, n. S.	440	530	59	31
30	400	*ABC*	Schuckmann Flöz n. O.	160	430	60	32
31	400	*XYZ*	Andreas Flöz n. W.	850	940	62	34
32	400	*ABC*	Heinitz Flöz	920	1010	61	33
33	530	*ABC*	Pochhammer Flöz	260	590	63	35
34	530	*ABC*	Schuckmann Flöz	590	790	64	36

Von den genannten Seismogrammen sind in dieser Arbeit die Diagramme Nr. 46, 54, 61, 64 auf S. 41 und 39 abgebildet.

Die seismischen Messungen auf den Delbrückschächten wurden in der Zeit vom 29. September bis zum 13. Oktober 1930 durchgeführt.

Die Auswertung der Diagramme.

Das Ziel der Auswertung der Diagramme ist der Rückschluß auf die wahre Bodenbewegung. Es ist also in jedem Falle die wahre Vergrößerung $\mathfrak{V}$ zu ermitteln, mit der die Bewegung im Seismogramm aufgezeichnet ist. Werden von einer Maschine reine Sinus-Grundschwingungen im Boden erregt, wie die Massendruckdiagramme der Kompressoren auf den Blücherschächten es zeigen, und können diese Grundschwingungen, wie an Hand von Seismogramm 2 bis 34 der vorliegenden Arbeit, im Gelände verfolgt werden, so ist lediglich die Division der gemessenen Amplituden a durch die wahre Vergrößerung $\mathfrak{V}$ durchzuführen, um den gewünschten Rückschluß zu ziehen.

Schwieriger werden die Verhältnisse, wenn von der Maschine gleichzeitig Grund- und Oberschwingungen ausgehen, wie wir es bei den Gasmaschinen auf den Delbrückschächten sahen. Das im Seismogramm vorliegende Bild der Bodenschwingung ist dann insofern verzerrt, als die wahre Vergrößerung $\mathfrak{V}$ und die Phasenverzögerung des Indikators gegenüber der Bodenbewegung für Grund- und Oberschwingung verschieden ist. Der dadurch entstehende scheinbare Fehler kann beseitigt werden, wenn es gelingt, aus der Superposition von Schwingung und Oberschwingungen, die das Seismogramm darstellt, rückwärts auf die Größe von Grund- und Oberschwingungen zu schließen, um dann einzeln die Vergrößerung und Verzögerung zu studieren, mit der sie aufgezeichnet sind.

Runge hat in seiner Abhandlung „Theorie und Praxis der Reihen“[14] auf Grund der Methode der kleinsten Quadrate einen Weg gewiesen, jede empirisch gegebene Funktion $N(\varphi)$ in trigonometrische Funktionen von φ und dessen Vielfachen zu zerlegen.

$$N(\varphi) = b_0 + a_1 \cdot \sin \varphi + a_2 \cdot \sin 2\varphi + \cdots + a_n \cdot \sin n\varphi + b_1 \cdot \cos \varphi + b_2 \cdot \cos 2\varphi + \cdots + b_n \cdot \cos n\varphi .$$

Bestimmt man innerhalb einer Periode durch Messung $2n + 1$ Ordinaten, so lassen sich zunächst die $2n + 1$ Konstanten dieser Gleichung bestimmen. Durch Zusammenfassung der entsprechenden Sinus- und Kosinusglieder läßt sich diese Gleichung auf die Form bringen

$$N(\varphi) = (b_0) + A_1 \sin(\varphi + \delta_1) + A_2 \sin(2\varphi + \delta_2) + \cdots + A_n \sin(n\varphi + \delta_n),$$

worin b_0 eine Konstante, $A_1, A_2, A_3, \ldots, A_n$ die Amplituden und $\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_n$ die Phasenverschiebungen der einzelnen Sinusschwingungen sind.

Durch passende Wahl der Anzahl und der Lage der durch Messung zu bestimmenden Ordinaten innerhalb einer Periode der Gesamtschwingung gelingt es Runge, die sämtlichen Konstanten b_0, $A_1 - A_n$ und $\delta_1 - \delta_n$ in einfacher Weise und mit hinreichender Genauigkeit zu berechnen.

---

[14] Runge: Theorie und Praxis der Reihen. Leipzig 1904.

Nach dieser Methode wurde eine Schwingung des Seismogramm 8 (siehe Abb. 32) bearbeitet. Die „harmonische Analyse" zeigt, daß schon die erste Oberschwingung vernachlässigt werden kann, wir haben es, wie schon erwähnt, auf den Blücherschächten mit fast reinen Sinus-Grundschwingungen zu tun.

Analysieren wir dagegen ein Seismogramm, das von den Bodenbewegungen durch eine Gasmaschine auf den Delbrückschächten herrührt, so ergibt sich ein wesentlich anderes Bild. Abb. 26 zeigt das Ergebnis der Bearbeitung von Seismogramm 50. (Seismogramm 50 ist auf Abb. 16 gezeigt.) Neben der Grundschwingung mit der Periode der Maschine sehen wir eine kräftige Oberschwingung mit der doppelten Maschinenperiode. Ist nun eine zweite Maschine in Betrieb, so wird das resultierende Schwingungsbild wesentlich von der Phasenverschiebung der Schubkurbelgetriebe abhängen. Diese Abhängigkeit kann man mit großer Deutlichkeit beobachten, wenn man das Anfahren einer zweiten Maschine registriert, während die erste schon mit voller Tourenzahl läuft. Seismogramm 51, das ebenso wie 50 auf Stand 14, also in 60 m Entfernung bei kleinster eingestellter Vergrößerung aufgenommen wurde, zeigt ein solches Bild (Abb. 27): zunächst läuft, wie auf Seismogramm 50, die Maschine V allein, dann wird Nr. II außerdem angelassen. Sobald die Tourenzahl von II derjenigen von V nahe kommt, sieht man deutlich, wie sämtliche Phasen der gegenseitigen Überlagerung durchlaufen werden. An der Stelle *A* laufen die Maschinen etwa im „Gleichtakt", die Energien von Grund- und Oberschwingung addieren sich, an der Stelle *B* ist etwa das Stadium des „Gegentakts" erreicht, die Grundschwingung tritt völlig in den Hintergrund (siehe besonders die Horizontalkomponente H_1 Gleitbahnrichtung). Das Diagramm zeigt mit Deutlichkeit, welch großen Vorteil das von der Verwaltung der Delbrückschächte angeordnete Fahren im Gegentakt (s. o.) einem etwaigen Betrieb im Gleichtakt gegenüber hat, es drängt aber gleichzeitig die Frage auf, ob das Optimum, d. h. das Minimum an schädlichen Schwingungswirkungen damit schon erreicht wird. Dabei ist zu berücksichtigen, daß man in der Erdbebenkunde im allgemeinen[15] die auftretenden Be-

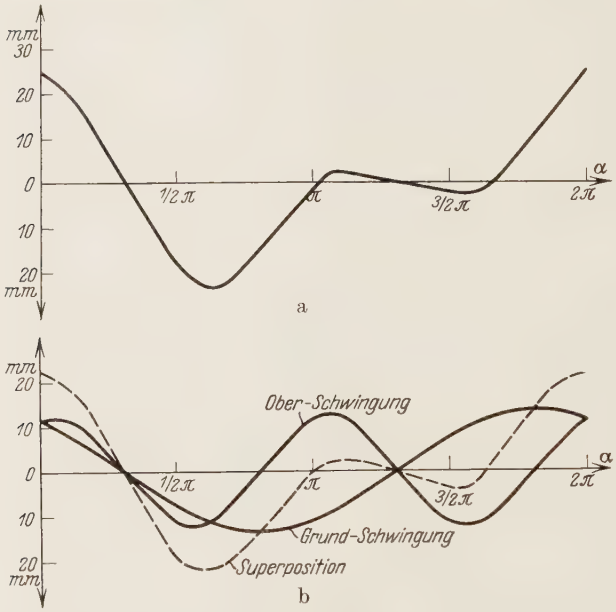


Abb. 26. Seismogramm 50, Horizontalkomponente H1.
a Schwingungsbild entsprechend 12 gemessenen Ordinaten.
b Ergebnis der harmonischen Analyse: Grund- und erste Oberschwingung.

[15] Erdbebenskala von Cancani, 1903; siehe u. a. bei Sieberg: a. a. O., S. 100.

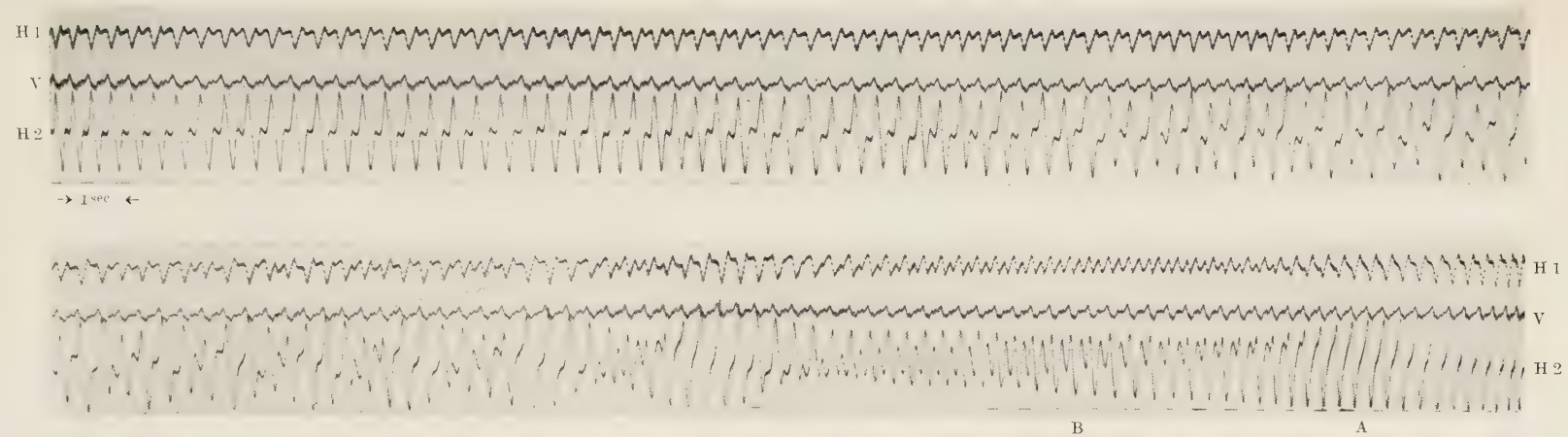


Abb. 27. Seismogramm 51 (ein Fünftel der Größe des Originals). Indikatorvergrößerung ca. 500fach. Delbrückschächte, über Tage. Stand 14, 60 m östlich der Zentrale. Maschine V läuft; das Diagramm zeigt das zusätzliche Anlassen von Maschine II.

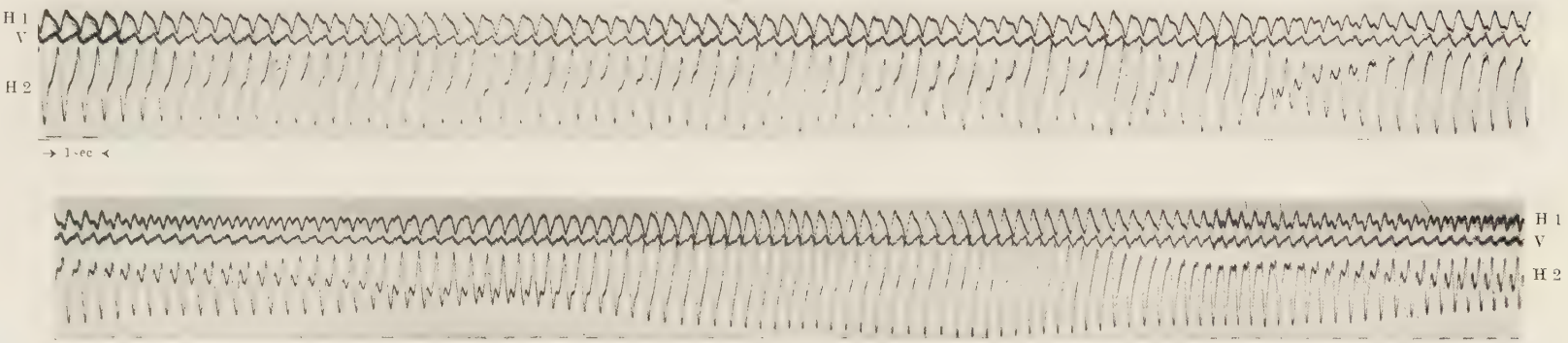


Abb. 28. Seismogramm 52 (ein Sechstel der Größe des Originals). Indikatorvergrößerung ca. 500fach. Delbrückschächte, über Tage, Stand 14, 60 m östlich der Zentrale. Maschinen V und II laufen; das Diagramm zeigt das zusätzliche Anlassen von Maschine I.

schleunigungen als Maßstab für die Schadenwirkung wählt. Besitzen aber Grund- und Oberschwingung, wie auf Seismogramm 50 durch harmonische Analyse gezeigt, etwa gleiche Amplituden, so verhalten sich die auftretenden Beschleunigungen umgekehrt wie die Quadrate ihrer Schwingungszeiten, in unserem Falle also wie 1 : 4. Man wird also gut tun, beim Betrieb einer Vielheit von Großkolbenmaschinen zur Vermeidung lästiger Schwingungserscheinungen Wert auf die gegenseitige Aufhebung der Oberschwingungen durch geeignete Phasenverschiebung zu legen. Beim Betrieb von nur zwei Maschinen etwa gleichen Ausmaßes kann das in einfacher Weise geschehen, indem man eine Phasendifferenz von 90° wählt, wie das bei zweiseitigen Verbundmaschinen mit Rücksicht auf das Kräftespiel der Schubkurbelgetriebe an der gemeinsamen Kraftwelle geschieht (vgl. das fast völlige Fehlen von Oberschwingungen bei dem Beispiel der Kompressoren auf den Blücherschächten).

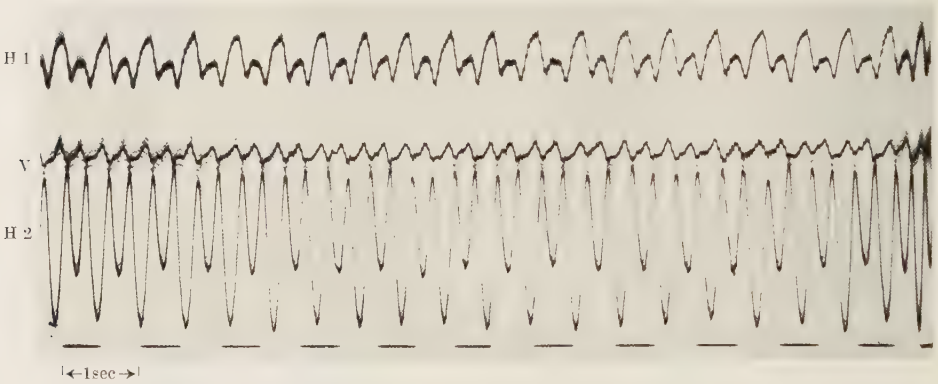


Abb. 29. Seismogramm 40. (4,3 Zehntel der Größe des Originals.) Indikatorvergrößerung ca. 500fach. Stand 14, 60 m östlich der Zentrale, Delbrückschächte. Maschinen II, IV, V in Betrieb.

Wie sich das Anlassen einer dritten Maschine auf die Bodenschwingungen auswirkt, ist auf Seismogramm 51 (Abb. 28) gezeigt, das ebenfalls auf Stand 14 aufgenommen wurde. Haben sich die Maschinen dann auf die gleiche Tourenzahl eingestellt, so ergibt sich bei der auf den Delbrückschächten üblichen Kurbelphasenanordnung das auf Abb. 29 dargestellte Schwingungsbild. (Seismogramm 40.) Bei Aufnahme des Diagramms liefen die Maschinen IV und V im Gegentakt, jedoch II im Gleichtakt mit V. Die harmonische Analyse (siehe Abb. 30) zeigt das starke Vorherrschen der Oberschwingung: sie ist, wie aus der Phasenanordnung der Schubkurbelgetriebe ja ohne weiteres hervorgeht, ebenso kräftig, als liefen sämtliche drei Maschinen im Gleichtakt.

Bei der komplizierten Zusammensetzung der Schwingungen beim gleichzeitigen Betrieb einer Vielheit von Maschinen einerseits und der Verschiedenartigkeit der Dämpfung der Bodenschwingungen verschiedener Periode andererseits und endlich des Einflusses der verschiedenen Elastizität des Erdbodens an verschiedenen Orten wegen empfehlen sich seismische Messungen an den besonders in Mitleidenschaft gezogenen Gebäuden (Türme, Schornsteine usw.). Es sind mir Fälle bekannt geworden, in denen auf Grund seismischer Studien Änderungen in der Schaltung der Maschinen vorgenommen und dadurch Schadenquellen der erwähnten Art mit gutem Erfolg bekämpft worden sind.

In dieser Arbeit ist von einer harmonischen Analyse jedes einzelnen Diagramms abgesehen, als Grundlage für die Ermittlung der Bodenbewegung vielmehr die den Diagrammen unmittelbar entnommene mittlere Schwingungsweite gewählt worden. Dabei machen wir einen gewissen Fehler, der im Falle der Blücherschächte des absoluten Vorherrschens der Grundschwingung wegen jedoch so gering ist, daß er unbedenklich vernachlässigt werden kann. Im Fall der Delbrückschächte entstehen, wie bereits oben erwähnt, durch die gegenseitige Superposition von acht verschiedenen Schwingungen (vier Maschinen erzeugen je eine Grund- und Oberschwingung) außerordentlich komplizierte Schwingungsvorgänge. Der Verfasser kam nach eingehenden Studien zu der Überzeugung, daß die Zerlegung in Grund- und Oberschwingung, von denen jede dann wieder eine Superposition von vier verschiedenen Wellenbewegungen gleicher Periode, aber verschiedener Phase sein würde, die Annäherung an die wirklichen Verhältnisse nicht wesentlich zu verbessern imstande wäre. Im übrigen ist bei der Bewertung der Messungsergebnisse den hier erörterten Komplikationen weitgehend Rechnung getragen worden.

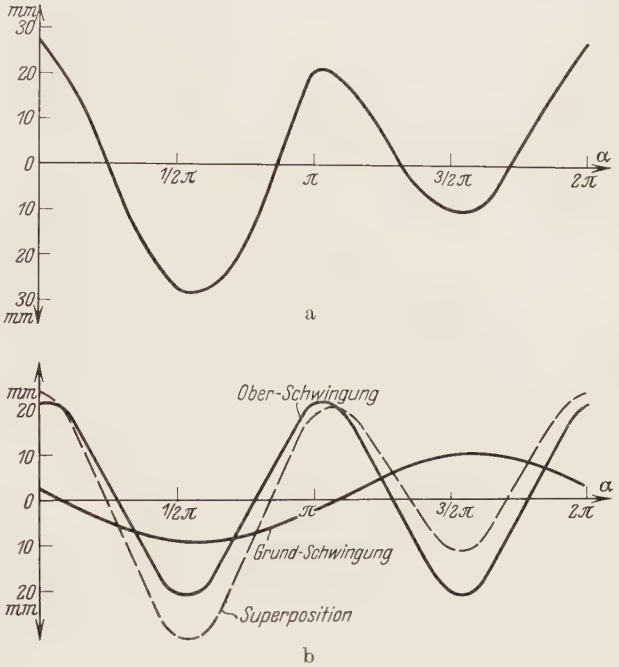


Abb. 30. Seismogramm 40, Horizontalkomponente H 2.
a Schwingungsbild entsprechend 12 gemessenen Ordinaten.
b Ergebnis der harmonischen Analyse: Grund- und erste Oberschwingung.

Die Seismogramme wurden so ausgewertet, daß an mehreren Stellen jeder Kurve die Schwingungsweite in Millimetern gemessen wurde. Die Mittelwerte $2\,a$ aus diesen Messungen werden durch die wahre Vergrößerung dividiert, die in der oben genannten Weise von der Indikatorvergrößerung V, dem Dämpfungsverhältnis ε und der Proportion $\frac{T}{T_0}$ abhängig ist. Der Faktor, mit dem die Indikatorvergrößerung V zu multiplizieren ist, um die wahre Vergrößerung $\mathfrak{V}$ zu erhalten, soll mit F bezeichnet werden. Da wir nicht mit der Schwingungsweite, sondern mit der Amplitude rechnen, ist noch durch 2 zu dividieren, und da wir die Bodenbewegung ihrer geringen Größenordnung wegen nicht in Millimetern, sondern in mμ (Millionstel Millimetern) ausdrücken, ist das Ganze noch mit 10^6 zu multiplizieren. Für die Amplitude A_x ergibt sich also

$$A_x = \frac{2\,a \cdot 10^6}{V \cdot F \cdot 2}.$$

Diese Rechnung wird für jede der drei Komponenten durchgeführt, sodaß sich bei jeder Beobachtung drei Amplituden A 1 (horizontal, Gleitbahnrichtung), A 2 (horizontal, Richtung senkrecht zur Gleitbahn) und A 3 (vertikal) ergeben. Die Komponenten werden durch vektorielle Addition zu einer Gesamtschwingung mit der Amplitude A zusammengefaßt.

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}.$$

Bemerkt sei noch, daß bei den Messungen über und unter Tage in den weitaus meisten Fällen die Amplitude A 1 überwiegt, so daß die Hauptschwingungsrichtung jedenfalls derjenigen der Gleitbahn nahekommt.

Der Gang der Rechnung ist an dem Beispiel des Seismogramm 65 (Abb. 38, S. 39) dargelegt. Die gesamten Ergebnisse der Amplitudenberechnungen für die Bodenbewegung sind auf S. 31ff. tabellarisch zusammengestellt.

Beispiel für den Gang der Rechnung zur Ermittlung der Amplitude A der wahren Bodenbewegung aus der auf dem Diagramm gemessenen Schwingungsweite 2a.

Versuchsreihe: Delbrückschächte. *Maschinen 1, 2, 4, 5*

Datum: *11ten Oktober* 1930 Stand: *20*

Seismogramm Nr.: *65* Dämpfungskurve Nr: *37*

Instrument-Konstanten (Bestimmung vom *10ten Okt.* 1930)

Gegenstand		Dim.	Horiz. Instr. H 1	Horiz. Instr. H 2	Vert. Instr. V
Eigenperiode	To	sec	*1,04*	*0,85*	*0,82*
Äquival. Pendellänge	L	m	*0,27*	*0,18*	*0,167*
Indik. Ausschlag bez. auf eine Umdrehung d. Neigungsschraube N		mm	*1030*	*1140*	
Indik. Ausschlag bei Auflegen von 0,47 g Gew.		mm			*105*
Indikator-Länge	I	m	*596*	*659*	*344*
Indikator-Vergrößerung	V		*2220* fach	*3660* fach	*2060* fach
Dämpfungsverhältnis	$\varepsilon : 1$		*2,8*:1	*3*:1	*4,3*:1
Faktor $\sqrt{s}$	F		*1,29*	*1,37*	*1,29*

Amplituden-Berechnung

für H 1 | Gleitbahn

gemessen: $2a = 17{,}8$ mm, also $A\,1 = \dfrac{2a \cdot 10^6}{V \cdot F \cdot 2} = 3102$ mμ (Max.)

$2a = 11{,}8$ mm, 2059 mμ (Min.)

$2a = 15$ mm, 2618 mμ (Mittel)

für H 2 | Gleitbahn

gemessen: $2a = 10$ mm, also $A\,2 = \dfrac{2a \cdot 10^6}{V \cdot F \cdot 2} = 997{,}5$ mμ (Max.)

$2a = 5{,}8$ mm, 579 mμ (Min.)

$2a = 8{,}3$ mm, 828 mμ (Mittel)

für V

gemessen: $2a = 2{,}5$ mm, also $A\,3 = \frac{2a \cdot 10^6}{V \cdot F \cdot 2} = 471$ mμ (Max.)

$2a = 1{,}3$ mm, 244 mμ (Min.)

$2a = 1{,}9$ mm, 358 mμ (Mittel)

daher $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2} = \underline{\underline{2770}}$ mμ

Beobachtungen auf den Blücherschächten.

Über Tage.

Std. Nr.	Seism. Nr.	Masch.	Horizontal-Schw. A 1 ∥ Gleitb. Instr.	Ampl. mμ	A 2 ⊥ Gleitb. Instr.	Ampl. mμ	Vert. A 3 Ampl. mμ	Ges. A Ampl. mμ	Bemerkungen
1	3	ND	H 2	6280	H 1	559	2435	6760	Maschine läuft m.
1	4	ND	H 1	5790	H 2	701	1510	6030	n=60/Min.Touren
1	31	ND	H 1	7620	H 2	826	?	7660	Starke Stöße
1	32	HD	H 1	6970	H 2	274	?	7020	d. Masch.
2	2	ND	H 1	828	H 2	175	—	846	n = 60/Min.
2	5	ND	H 2	781	H 1	110	—	789	n = 60/Min.
2	25	ND	H 1	1746	H 2	390	—	1790	regelm. Schw.
2	26	HD	H 1	1590	H 2	444	—	1650	
3	6	ND	H 2	330	H 1	136	—	356	Masch. läuft
3	7	ND	H 1	272	H 2	208	—	342	m. n = 60/Min.
3	8	ND	H 1	794	H 2	748	—	1092	Ampl. schwankt
3	9	HD	H 1	1158	H 2	1138	—	1622	
4	10	ND	H 1	1320	H 2	495	—	1410	Maximal-Wert
4	10	ND	H 1	689	H 2	487	—	844	Minimal-Wert
4	11	HD	H 1	921	H 2	379	—	1150	Regelm. Schw.
5	21	ND	H 2	470	H 1	336	—	577	Ampl. schwankt
5	22	HD	H 2	?	H 1	423	—	679(?)	H 2 nicht reg.
6	23	ND	H 1	384	H 2	264	—	467	Regelm. Schw.
6	24	HD	H 1	240	H 2	285	—	372	

Unter Tage.

165 m S.

7	12	ND	H 1	120	H 2	172	—	210	H 1 30° z. Gleit.
7	14	ND	H 2	197	H 1	98	—	220	H 2 30° z. Gleit.
7	13	HD	H 1	99	H 2	122	—	157	H 1 30° z. Gleit.
7	15	HD	H 2	88	H 1	122	—	151	H 2 30° z. Gleit.
8	16	ND	H 2	134	H 1	61	—	148	
8	17	HD	H 2	87	H 1	62	—	107	
9	18	ND	H 2	150	H 1	52	—	159	
9a	19	ND	H 2	147	H 1	?	—	?	H 1 nicht re-
9a	20	HD	H 2	61	H 1	?	—	?	gistr.

250 m. S.

12	27	ND	H 2	106	H 1	22	—	108	
12	28	HD	H 2	78	H 1	18	—	80	
13	29a	ND	H 1	71	H 2	19	—	74	
13	29b	HD	H 1	50	H 2	—	—	50	

Beobachtungen auf den Delbrückschächten.
Über Tage.

Std. Nr.	Seism. Nr.	Masch. Nr.	Horizontal-Schw. Instr. H Nr.	A 1[1] mμ	Instr. H Nr.	A 2[2] mμ	Vert. Schw. A 3 mμ	Ges. A mμ	Bemerkungen
14	39	2, 4, 5	2	23080	1	10630	10720	27300	Mittelwert, Vergr. zu groß. f. Pap.
14	40	2, 4, 5	2	24580	1	12530	12230		Maximal-Werte
				21930		10480	8380		Minimal-Werte
				23380		11520	9390	27640	Mittelwert
15	68/70	1, 2, 4, 5	1	18010	2	4170	4490		Max.
				11890		2875	4490		Min.
				14430		3763	4490	15590	Mittelwert
16	41	2, 4, 5	2	3680	1	4800	1970		Max.
				3195		3460	796		Min.
				3380		4290	1070	5560	Mittel
17	42	2, 4, 5	1	1710	2	1358	1306		Max.
				1229		1028	1306		Min.
				1418		1192	1306	2268	Mittel
18	44	1, 2, 4, 5	2	76	1	427	759		Max.
				?		228	594		Min.
				76		410	642	765	Mittel
19	71/73	1, 2, 4, 5	1	14300	2	5020	5310		Max.
				12220		2748	2455		Min.
				13520		3978	3528	14520	Mittel
20	65	1, 2, 4, 5	1	3102	2	997	471		Max.
				2059		579	244		Min.
				2618		828	358	2770	Mittel
21	66	1, 2, 4, 5	1	1779	2	745	258		Max.
				1027		601	258		Min.
				1452		642	258	1609	Mittel
		130 m S.			Unter Tage.				
22	47	1, 2, 4, 5	1	702	2	163	88		Max.
				426			88		Min.
				639		82	88	649	Mittel
		230 m S.							
23	46	1, 2, 4, 5	2	200	1	121	76	246	
24	48	1, 2, 4, 5	2	106	1	165	74	208	
		300 m S.							
25	54	1, 2, 4, 5	2	66	1	44	140	161	Oberschw. stark
26	56	4, 5	2	50	1	62	55	97	„ mäßig
26	57	4, 5	1	62	2	30	55	88	„ „
27	55	2, 4, 5	2	21	1	41	—	46	„ n. erk.
28	58	4, 5	1	119	2	25	55	134	„ mäßig
29	59	4, 5	1	105	2	69	85	159	„ schwach
		400 m S.							
30	60	1, 4, 5	1	146	2	76	135	203	„ nur vert.
31	62	1, 2, 4, 5	2	38	1	51	18	66	„ schwach
32	61	1, 4, 5	1	45	2	34	18	59	„ „
		530 m S.							
33	63	1, 2, 4, 5	1	152	2	9	66	166	
34	64	1, 2, 4, 5	1	134	2	18	32	139	„ deutlich

[1] Komponente ∥ Gleitbahn. [2] Komponente ⊥ Gleitbahn.

Die Versuchsergebnisse.

1. Blücherschächte.

a) Über Tage.

Wie oben dargelegt, wurden die Schwingungen des Hochdruckkompressors auf den Blücherschächten an sechs Beobachtungspunkten (1 bis 6) über Tage registriert, deren Anordnung entlang dem Nord-Süd-Profil ABC aus Tafel I hervorgeht. An sämtlichen Punkten waren die durch Hochdruck- und Niederdruckmaschine erzeugten Bodenschwingungen von ungefähr gleicher Größe, wie es auch die Massendruckdiagramme (siehe Abb. 7 und 10) erwarten lassen. Den Messungen am Hochdruckkompressor ist aus dem oben dargelegten Grunde des günstigeren Periodenverhältnisses $\frac{T}{T_0}$ [16] das Hauptgewicht beigemessen worden, ihre Ergebnisse sind in Abb. 31 graphisch dargestellt. Die ausgezogene Linie entspricht der Amplituden - Abnahme, wie sie flächenhafter Energieausbreitung entsprechen würde; der Absorptionskoeffizient errechnet sich zu

$$\alpha = 0{,}00021.$$ [17]

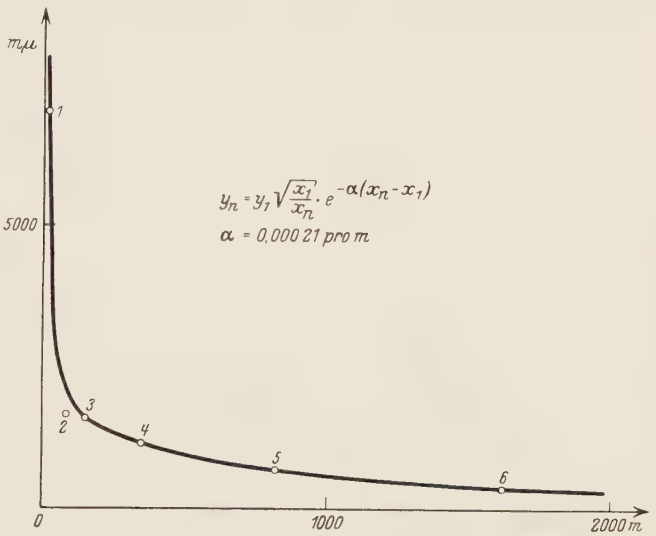


Abb. 31. Abnahme der Amplituden mit der Entfernung. Blücherschächte, Profil ABC über Tage.

b) Unter Tage.

1. Räumliche Ausbreitung. Die durch die Kompressoren erzeugten Bodenschwingungen erwiesen sich unter Tage auch in der tiefsten Sohle und in den verschiedenen Abständen und Richtungen von der Maschine auf allen sieben

[16] Darin ist: T Störungsperiode, T_0 Eigenperiode des Instruments.

[17] Das Abnahmegesetz für flächenhafte Energieausbreitung lautet:

$$y_n = y_1 \sqrt{\frac{x_1}{x_n}} \cdot e^{-\alpha (x_n - x_1)}; \qquad \text{(s. o.)}$$

zur Berechnung von α ist es in der Form anzusetzen:

$$\alpha = \frac{\lg \left(\frac{y_1}{y_n} \frac{x_1}{x_n} \right)}{(x_n - x_1) \lg e};$$

geht man von dem dritten und letzten Punkt des Profils ABC (den Punkten 3 und 6) aus, so errechnet sich durch Einsetzung

$$\alpha = 0{,}00021 \text{ pro m}.$$

Die entsprechende Abnahmekurve schmiegt sich an die empirisch gefundenen Werte in der ersichtlichen Weise an (Abb. 31).

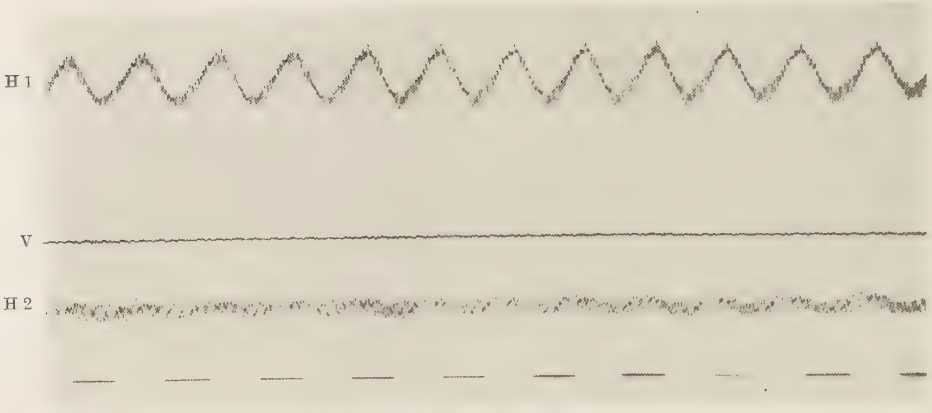


Abb. 32. Seismogramm 8 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergr. ca. 4000fach. Stand 3, über Tage, 170 m südlich des Niederdruckkompressors, Blücherschächte.

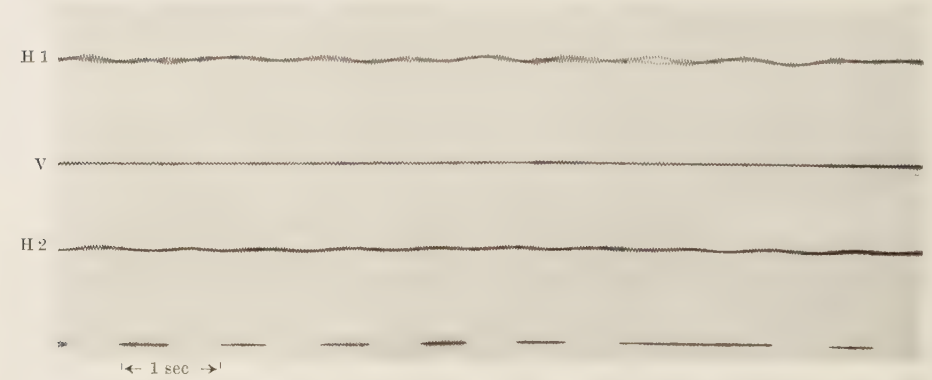


Abb. 34. Seismogramm 14 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergr. ca. 3200fach. Stand 7, unter Tage, 165 m Sohle. Niederdruckkompressor, Blücherschächte.

Beobachtungspunkten (7 bis 13) als meßbar. Damit ist der experimentelle Nachweis räumlicher Ausbreitung der Schwingungen in die Tiefe erbracht. Beim Eindringen in die Tiefe nehmen die Schwingungsamplituden wesentlich schärfer ab als bei Ausbreitung an der Oberfläche. Eine Gegenüberstellung der auf Stand 3 und 7 in etwa 170 m horizontalem bzw. seigerem Abstand aufgenommenen Diagramme zeigt diesen Unterschied in der Abnahme (Abb. 32, 33 und 34, 35).

2. Amplitudenabnahme nach der Tiefe, Absorptionskoeffizient. Auf Abb. 36 sind die der Maschine am nächsten liegenden Beobachtungspunkte beider Sohlen, Stand 7 und 12, im Profil dargestellt. Die Amplitude nimmt beim Fortschreiten der Welle von Stand 7 bis Stand 12 von 154 mμ auf 80 mμ ab. Lägen die beiden Punkte lotrecht unter der Maschine, so würde sich nach der Gesetzmäßigkeit räumlicher Energieausbreitung (Mintrop[1 u. 8])

$$y_2 = y_1 \cdot \frac{x_1}{x_2} \cdot e^{-\alpha (x_1 - x_2)} \quad (18)$$

— Blücherschächte.
und unter Tage in etwa 170 m Abstand.

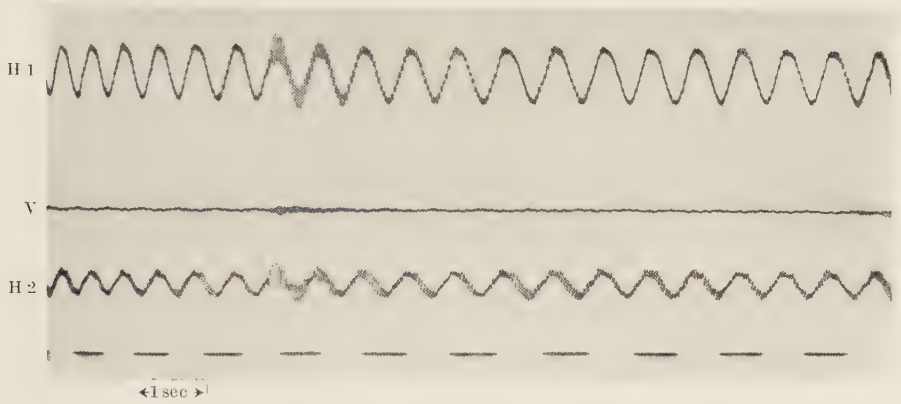


Abb. 33. Seismogramm 9 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergrößerung ca. 4000fach. Stand 3, über Tage, 160 m südlich des Hochdruckkompressors, Blücherschächte.

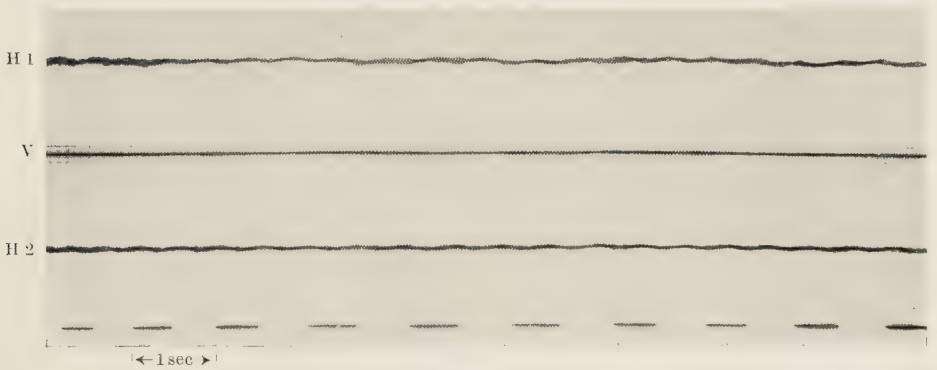


Abb. 35. Seismogramm 15 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergr. ca. 3200fach. Stand 7, unter Tage, Hochdruckkompressor, Blücherschächte.

der Absorptionskoeffizient in einfachster Weise zu $\alpha = 0{,}00283$ ergeben. Für eine genauere Ermittlung von α sind jedoch die söhligen Abstände zu berücksichtigen, ferner muß in Betracht gezogen werden, daß die den Weg der Wellen in die Tiefe kennzeichnenden „Stoßstrahlen" an der Grenzfläche Tertiär-Karbon,

[18] Bei Annahme kugelförmiger Energieausbreitung ist, wenn man von der Absorption absieht, die Gesamtsumme der Energien E_1 und E_2 an den Oberflächen zweier konzentrischer Kugeln mit der Energiequelle als Mittelpunkt und x_1 und x_2 als Radien konstant.

$$E_1 \cdot 4\,\pi\,x_1^2 = E_2 \cdot 4\,\pi\,x_2^2 \quad \text{oder} \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{x_2^2}{x_1^2},$$

und, da die Energien sich wie die Quadrate der Amplituden verhalten,

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{x_2}{x_1} \quad \text{oder} \quad y_2 = y_1 \cdot \frac{x_1}{x_2};$$

dazu kommt dann noch das Dämpfungsglied von der Form $e^{-\alpha(x_2 - x_1)}$.

den verschiedenen elastischen Eigenschaften der Medien entsprechend, in der aus Abb. 36 und 37 ersichtlichen Weise[19] gebrochen werden. Als Abstand x von der Maschine hat also nicht die schräge Entfernung, sondern der Weg entlang diesen „Stoßstrahlen" zu gelten. Unter Berücksichtigung der so ermittelten Entfernungen errechnet sich der Absorptionskoeffizient zwischen Stand 7 und 12 zu $\alpha = 0{,}00208$. Dieser Koeffizient ermöglicht es, durch Extrapolieren auf die Schwingungsweite an jedem Punkt des Stoßstrahls zu schließen, soweit elastisch homogene Verhältnisse vorherrschen. Von besonderem Interesse ist die Amplitude an der Oberfläche des Karbon, also bei 70 m Teufe, die sich auf diesem Wege zu 460 mμ errechnet.

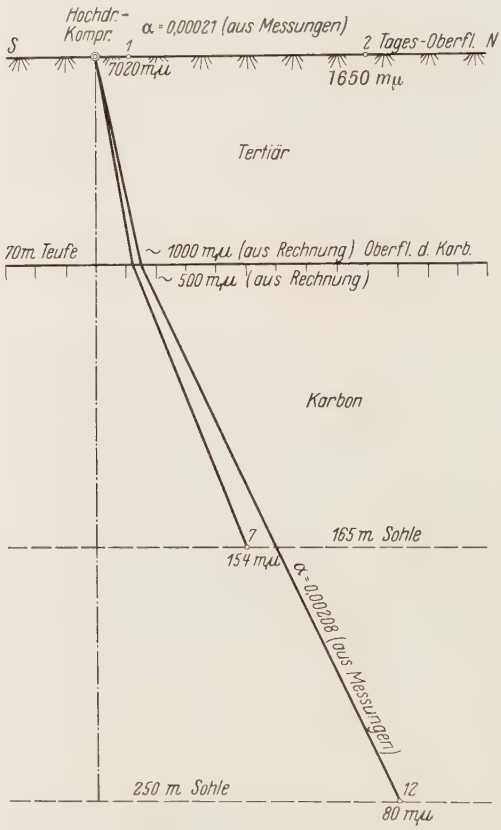


Abb. 36. Blücherschächte, Profil durch die Punkte *1, 2, 7, 12*. Maßstab ~ 1 : 2500.

3. Einfluß der Grenzfläche Tertiär-Karbon auf die Schwingungsamplitude. Zur Beantwortung der Frage, welchen Einfluß der Übergang der Wellen von den lockeren tertiären Schichten in das feste Karbon auf die Schwingungsamplitude hat, steht folgendes Material zur Verfügung:

1. Die Beobachtung auf Stand 1 in 11 m Entfernung von der Maschine; $y = 7020$ mμ (siehe Tabelle S. 31).

Dieser Wert ist an der Tagesoberfläche gemessen worden. Da aber in unmittelbarer Nähe der Maschine zweifellos mit kugelförmiger Ausbreitung der Energie gerechnet werden muß, ist die Annahme unbedenklich, daß 11 m senkrecht unter der Maschine Schwingungen etwa gleicher Amplitude auftreten.

2. Der durch Messung ermittelte Absorptionskoeffizient im Tertiär über Tage; $\alpha = 0{,}00021$.

3. Die errechnete Schwingungsamplitude an der Oberfläche des Karbon; $y = 460$ mμ.

4. Der durch Messung ermittelte Absorptionskoeffizient im Karbon nach der Tiefe zu; $\alpha = 0{,}00208$.

[19] $\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2}$, darin ist:
i_1 Winkel zwischen Einfallsstrahl und Lot,
i_2 Winkel zwischen gebrochenem Strahl und Lot,
v_1 Fortpflanzungsgeschwindigkeit longitudinaler seism. Wellen im Tertiär (ca. 2100 m/sec),
v_2 Fortpflanzungsgeschwindigkeit longitudinaler seism. Wellen im Karbon (ca. 4500 m/sec).

Wie entscheidend die Schichtgrenze auf die Schwingungsamplitude einwirkt, kann erkannt werden, wenn man zunächst unterstellt, sie sei nicht vorhanden und dementsprechend die oben angestellte Extrapolationsrechnung aus den Messungen aus Stand 7 und 12 bis zur Tagesoberfläche fortsetzt. Dabei kommt man für 11 m Abstand auf eine Amplitude von 3368 gegenüber 7020 gemessenen mμ, also nur auf die Hälfte des tatsächlich ermittelten Wertes. Diese Erscheinung kann auf zweierlei Weise erklärt werden:

1. Der Absorptionskoeffizient innerhalb des tertiären Deckgebirges ist höher als veranschlagt.

2. An der Schichtgrenze Tertiär-Karbon geht ein großer Teil der Schwingungsenergie durch Reflexion, Brechung und Absorption an der Grenzfläche selbst verloren.

Zu dem unter 1 genannten Argument ist zu sagen, daß es nach den an der Tagesoberfläche durch Messung ermittelten Absorptionsverhältnissen — α errechnet sich zu nur 0,00021 — wenig wahrscheinlich ist. Man wird es darüber hinaus mit Bestimmtheit ablehnen, wenn man sich klarmacht, wie groß der Absorptionskoeffizient sein müßte, um bei räumlicher Energieausbreitung von der auf Stand 1 gemessenen Amplitude auf die für die Oberfläche des Karbons errechnete zu kommen. Diese Rechnung ergibt den Wert von $\alpha = 0{,}01487$, der etwa 70 mal größer ist als der für das an der Oberfläche anstehende Tertiär und etwa 7 mal größer als der für das aus Sandstein und Schieferton bestehende Karbon ermittelte. Für das über dem Karbon anstehende Tertiär liegt der wirkliche Absorptionskoeffizient zweifellos zwischen den an der Tagesoberfläche und im Karbon ermittelten Werten, also zwischen 0,00021 und 0,00208.

Man wird also, dem Argument 2 entsprechend, mit einer sprunghaften Abnahme der Energie an der Grenzfläche Tertiär-Karbon zu rechnen haben, und die oben genannten Daten geben Anhaltspunkte, die ungefähre Größe dieses Sprungs zu berechnen.

Geht man von dem auf Stand 1 (Abb. 36) in 11 m Abstand beobachteten Wert aus, so ergibt das räumliche Abnahmegesetz für 71 m Abstand (Entfernung der Unterkante des Tertiär, auf dem Stoßstrahl nach Stand 7 gemessen) eine Amplitude von 1089 mμ, wenn man von der Dämpfung überhaupt absieht ($\alpha = 0$). Bei Anwendung des Absorptionskoeffizienten für über Tage ($\alpha = 0{,}00021$) ergibt sich eine Amplitude von $y = 1072$ mμ, und bei Anwendung des für das Karbon gefundenen Koeffizienten ($\alpha = 0{,}00208$) errechnet sich die Amplitude für die Schwingungen an der Unterkante des Tertiär zu $y = 958$ mμ. Es ist also an der Unterkante Tertiär mit einer Amplitude von rund 1000 mμ zu rechnen, während sich für die Oberkante des Karbon die Amplitude $y = 460$ mμ ergab. Beim Übergang vom Tertiär zum Karbon geht die Amplitude demnach auf etwa die Hälfte zurück.

4. Kontrollmessung. Die im vorigen Abschnitt geschilderten Ergebnisse sind von grundlegender Bedeutung, ihre Richtigkeit soll an Hand eines zweiten Systems einander zugeordneter Punkte geprüft werden. Punkt 8 und 13 sind in Abb. 37 im Profil dargestellt, für die Amplituden ergeben sich 107 und 50 mμ, ihre Abstände betragen, am Stoßstrahl gemessen, 224 bzw. 356 m; daraus errechnet sich ein Absorptionskoeffizient von $\alpha = 0{,}00226$ gegenüber 0,00208 aus der ersten Berechnung, die Werte stehen also in guter gegenseitiger Übereinstimmung.

Extrapolation ergibt für die Oberfläche des Karbon die Amplitude $y = 447$ mμ gegenüber 460 mμ aus der ersten Messung, also auch hier gut übereinstimmende Resultate.

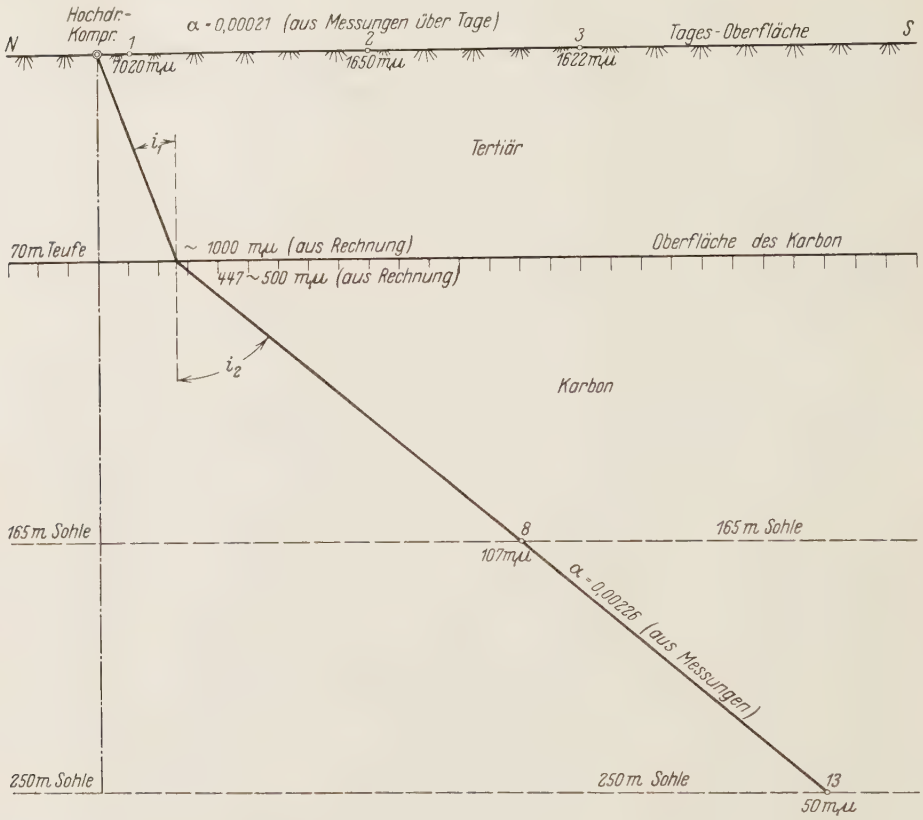


Abb. 37. Blücherschächte, Profil durch die Punkte *1, 2, 3, 8, 13*. Maßstab ~ 1 : 2500.

c) Profildarstellung der Messungsergebnisse auf den Blücherschächten.

Auf Tafel III sind die gesamten auf den Blücherschächten angestellten Beobachtungen im Profil dargestellt. Die sprunghafte Abnahme der Energie an der Grenzschicht Tertiär-Karbon macht sich durch Horizontalverschiebung der Linien gleicher Schwingungsamplituden, der „Isoseisten" bemerkbar. Auf der Karte ist weiterhin die Teufe angedeutet, in der dieselben Isoseisten sich, den Gesetzen räumlicher Energieausbreitung entsprechend, befinden dürften, wenn das Tertiär sich bis in derartige Tiefen erstrecken würde.

2. Delbrückschächte.

a) Vorbemerkung.

Die auf den Delbrückschächten angestellten Beobachtungen bestätigen, daß die von den Maschinen erzeugten Bodenschwingungen sich auf große Entfer-

Gasmaschinen — Delbrückschächte.
Schwingungsbeobachtungen über und unter Tage in etwa 1000 m Abstand.

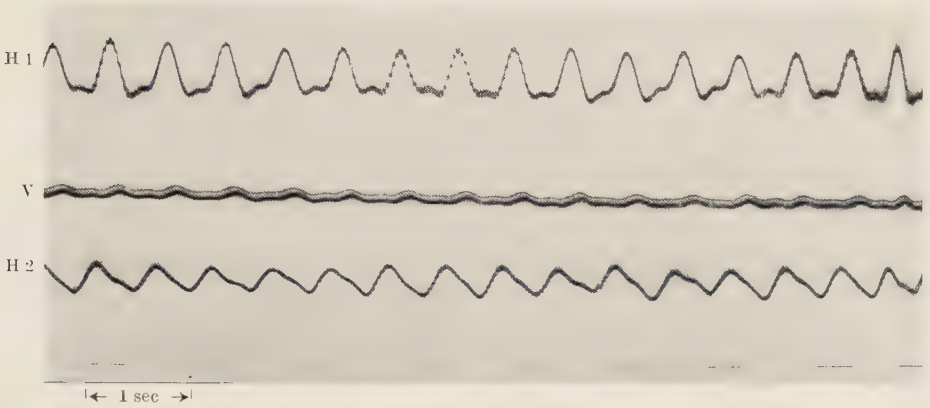


Abb. 38. Seismogramm 65 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergr. ca. 2700fach. Stand 20, über Tage, 1000 m nordwestlich der Gaszentrale, Delbrückschächte.

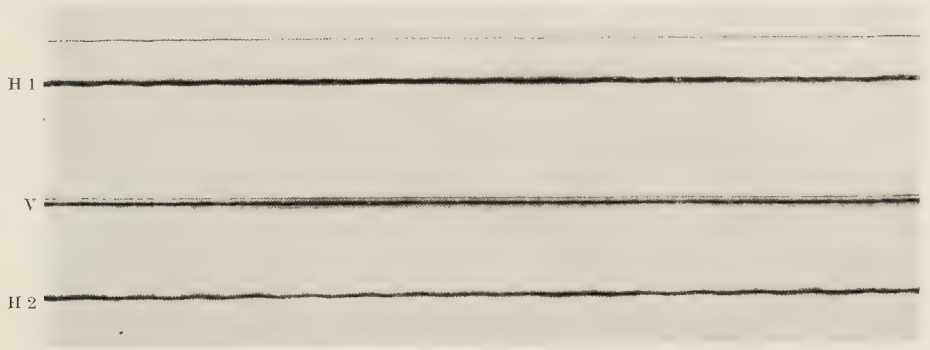


Abb. 39. Seismogramm 61 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergr. ca. 3000fach. Stand 32, unter Tage, 400 m S., 1010 m schräge Entfernung von der Gaszentrale, Delbrückschächte.

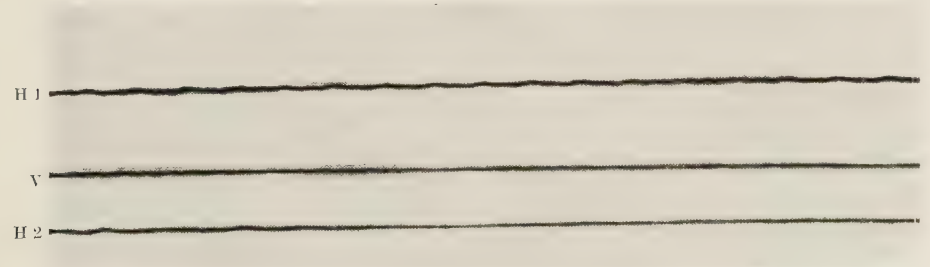


Abb. 40. Seismogramm 64 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergr. ca. 3000fach. Stand 34, unter Tage, 530 m S., 790 m schräge Entfernung von der Gaszentrale, Delbrückschächte.

Gasmaschinen —
Schwingungsbeobachtungen über

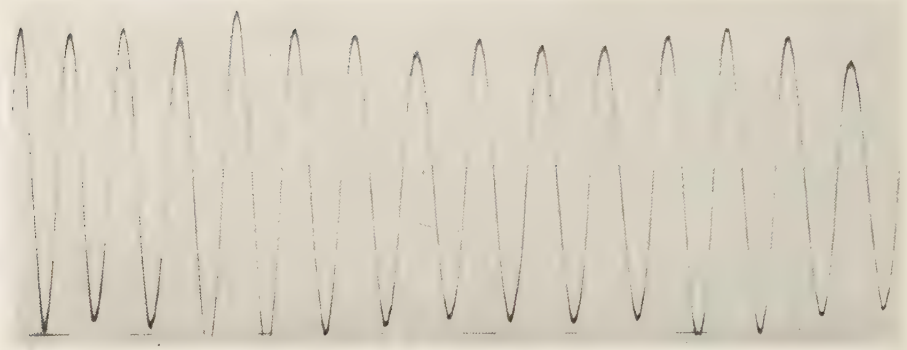


Abb. 41. Seismogramm 68 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergr. ca. 2600fach. Horizontalkomponente H 1 parallel zur Gleitbahn. Stand 15, über Tage, 410 m nordöstl. der Gaszentrale, Delbrückschächte.

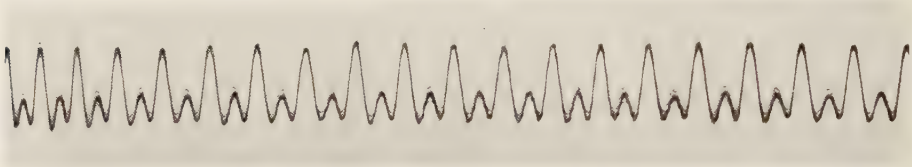


Abb. 42. Seismogramm 69 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergr. 2060fach, Vertikalkomponente, Stand 15.

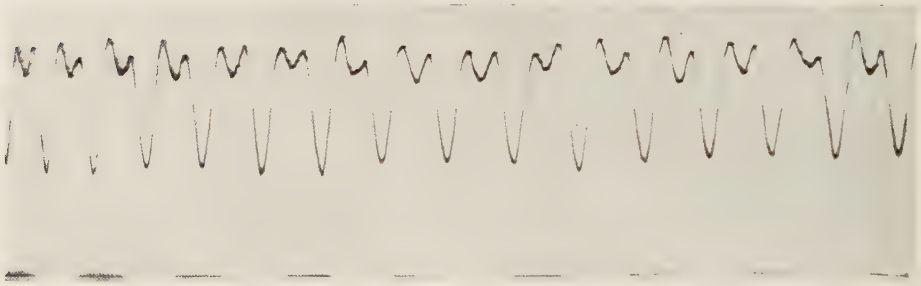
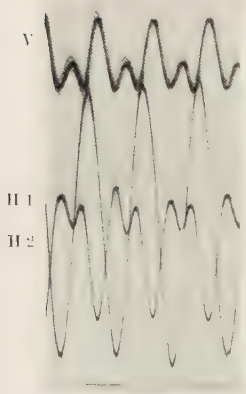


Abb. 43. Seismogramm 70 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergr. ca. 4400fach, Komponente H 2, Stand 15.



1← 1 sec →1
Abb. 44. Drei Komponenten.

nungen an der Erdoberfläche und bis in große Tiefen erstrecken. Die beiden Blätter Abb. 38 bis 40 und Abb. 41 bis 47 zeigen Diagramme, die in etwa 1000 m bzw. 300 m Abstand von den Maschinen bei verschiedenen Teufen (0 bis 530 m) aufgenommen sind. Durch die Vielheit der als Energiequelle dienenden Maschinen, von denen jede außer der Grundschwingung noch starke Oberschwingungen erzeugt, entstehen außerordentlich komplizierte Schwingungsbilder, es ist daher kaum möglich, Absorptionskoeffizienten mit der Genauigkeit zu ermitteln, wie es bei dem übersichtlicher liegenden Fall der Blücherschächte durchgeführt werden konnte.

— Delbrückschächte.
und unter Tage in etwa 300 m Abstand.

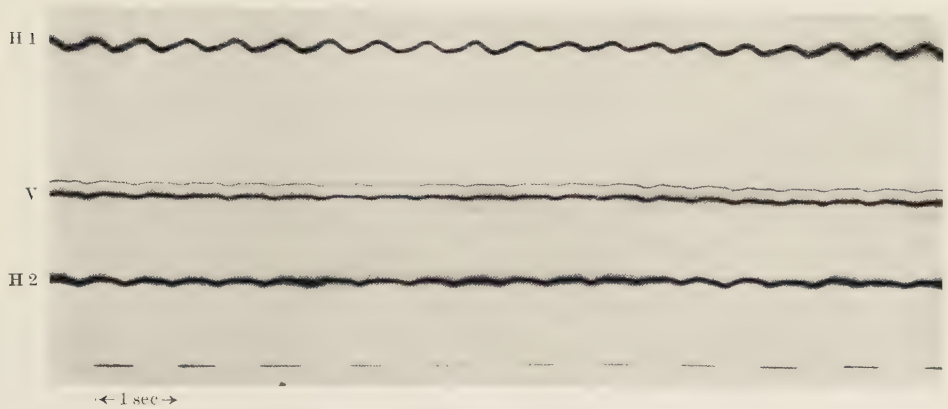


Abb. 45. Seismogramm 47 (3,4 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergr. ca. 2600fach, Stand 22, unter Tage, 130 m S., 280 m schräge Entfernung von der Gaszentrale, Delbrückschächte.

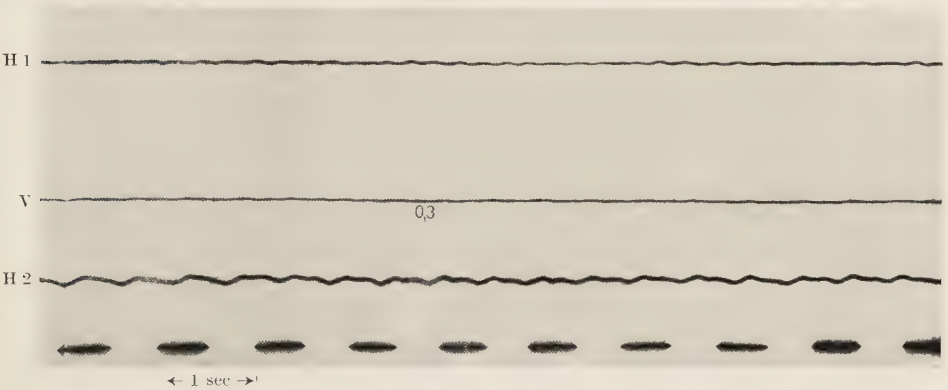


Abb. 46. Seismogramm 46 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergr. ca. 2600fach, Stand 23, unter Tage, 230 m S., 300 m schräge Entfernung von der Gaszentrale, Delbrückschächte.

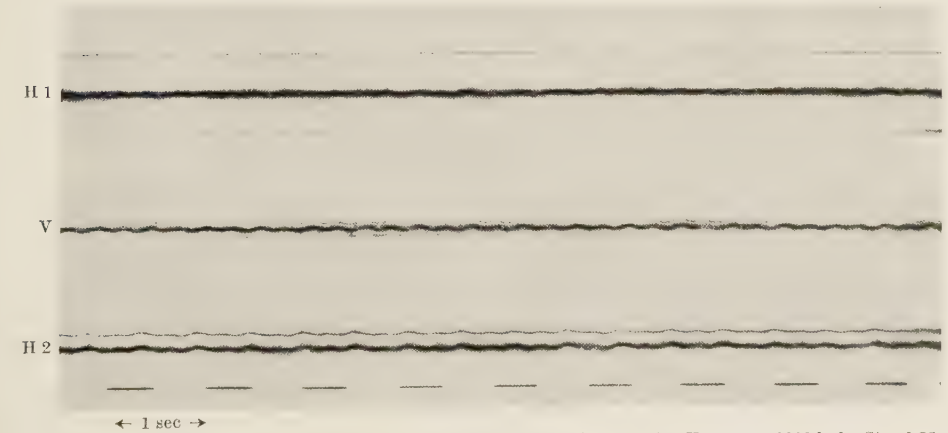


Abb. 47. Seismogramm 54 (4,3 Zehntel der Größe des Originals). Indikator-Vergr. ca. 3000fach, Stand 25, unter Tage, 300 m S., 320 m schräge Entfernung von der Gaszentrale, Delbrückschächte.

b) Messungsergebnisse über Tage.

Die Ergebnisse der auf den Profilen ABC und XYZ (siehe Tafel I) vorgenommenen Amplitudenmessungen sind auf Abb. 48 und 49 graphisch dargestellt. Von einer Ermittlung der Absorptionskoeffizienten ist aus oben genannten Gründen Abstand genommen worden.

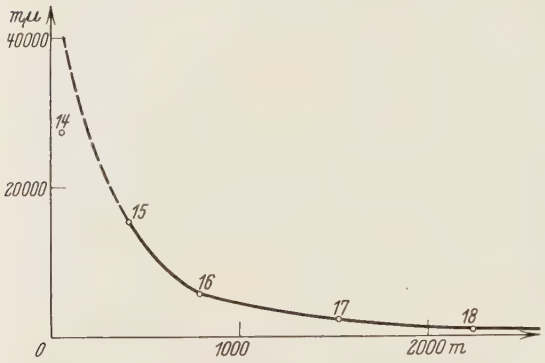


Abb. 48. Abnahme der Amplituden mit der Entfernung. Delbrückschächte, Profil ABC, über Tage.

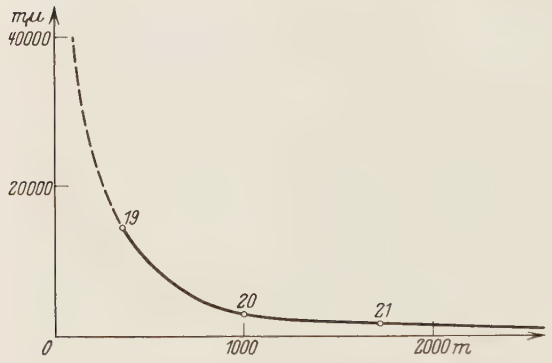


Abb. 49. Abnahme der Amplituden mit der Entfernung. Delbrückschächte, Profil XYZ, über Tage.

c) Messungsergebnisse unter Tage.

Die dreizehn Beobachtungen unter Tage, die sich bis zu der (tiefsten) 530-m-Sohle und bis auf einen Horizontalabstand von über 1000 m erstrecken, kennzeichnen die Größe des Gebirgskörpers, der durch Großkolbenmaschinen in Schwingungen versetzt wird, noch eindrücklicher als das erstgenannte Beispiel der Blücherschächte. Es sei besonders darauf hingewiesen, daß auch auf der tiefsten Sohle noch die Schwingungsamplitude von 166 mμ gemessen werden konnte.

Über die Ergebnisse der Unter-Tage-Messungen auf den Delbrückschächten kann weiterhin so viel gesagt werden, daß sie das oben genannte Abnahmegesetz nach der Tiefe bestätigen, auf einen Absorptionskoeffizienten von der Größenordnung des auf den Blücherschächten ermittelten schließen lassen und auf eine sprunghafte Energieabnahme der Schwingungen an der Schichtgrenze Tertiär-Karbon hindeuten.

d) Profildarstellung der Messungsergebnisse auf den Delbrückschächten.

Die gesamten Messungsergebnisse über und unter Tage längs den Linien ABC und XYZ auf den Delbrückschächten sind auf Tafel IV und V ganz entsprechend dem oben erläuterten Bild der Blücherschächte im Profil dargestellt. Die beiden Bilder zeigen die Horizontalverschiebung der „Isoseisten" entlang der Grenzfläche Tertiär/Karbon aufs deutlichste.

Zusammenfassung.

Die Ausbreitung von durch Großkolbenmaschinen im Untergrund erregten elastischen Schwingungen[20] wird an Hand seismischer Messungen auf zwei oberschlesischen Gruben über und unter Tage studiert.

Nach kurzer Auseinandersetzung der Ursachen solcher Schwingungen wird an Hand der Massendruckdiagramme der hier beobachteten Maschinen gezeigt, in welcher Form sie in den gewählten Beispielen auftreten. Als Aufnahmegerät dient ein Mintropsches Dreikomponenten-Seismometer, dessen Wirkungsweise und Anpassung für den besonderen Zweck der vorliegenden Untersuchung erläutert wird. Die Versuchsanordnung im Gelände wird beschrieben und dann auf die Auswertung der Diagramme eingegangen. Dabei wird an Hand der nach Runge dargestellten harmonischen Analyse auf die Parallelität der Massendruckdiagramme und Bodenschwingungen hingewiesen und einiges über die gegenseitige Superposition verschiedener Maschinenschwingungen gleicher Periode gesagt.

Durch Amplitudenmessungen wird dann die Verschiedenheit in der Ausbreitung der Schwingungsenergie an der Erdoberfläche gegen ihre Fortpflanzung in die Tiefe gezeigt und ihre Gesetzmäßigkeit untersucht. Endlich wird der Einfluß der Grenzfläche zwischen Tertiär und Karbon studiert, der sich in einer sprunghaften Abnahme der Energie bemerkbar macht.

[20] Über die Entstehung, Ausbreitung und Bekämpfung derartiger Schwingungen bzw. deren Schadenwirkung siehe außer den bereits genannten Arbeiten von Mintrop[1], Heinrich[2] und Sauer[3] noch:

Döhne: Über Druckwechsel und Stöße bei Maschinen mit Kurbelantrieb. Dissertation Hannover 1911, Vorwort.

Gerb: Die Fernübertragung von Bodenerschütterungen bei Maschinen mit hin- und hergehenden Massen. Z. V. d. I. **64**, 559.

Geiger: Störende Fernwirkungen von ortsfesten Kraftmaschinen, insbesondere Verbrennungsmaschinen. Z. V. d. I. **67**, 736.

Reiher: Schwingungserscheinungen an einem Hochhaus. Z. V. d. I. **74**, Nr 19.

Gerb: Beseitigung von Fundamentschwingungen durch Massenausgleich. Z. V. d. I. **74**, Nr 48.

Hort: Schwingungsschutz bei Hochbauten. Z. V. d. I. **75**, 569.

Rausch: Richtige und fehlerhafte Maschinengründungen. Z. V. d. I. **75**, Nr 34 u. 35 und weitere in dieser Abhandlung genannte Arbeiten desselben Verfassers.

Kranz: Bodenerschütterungen, Geophysik und Ingenieurgeologie. Z. prakt. Geologie **1931**, H. 3, S. 38, enthält weitere Literaturangaben.

Benutzte Literatur.

		Fußnote Nr.
1.	Mintrop, L.: Über die Ausbreitung der von den Massendrucken einer Großgasmaschine erzeugten Bodenschwingungen. Dissertation Göttingen 1911.	1
2.	Heinrich, A.: Über die Ausbreitung von Bodenschwingungen in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Untergrundes. Dissertation Breslau 1930.	2
3.	Sauer, H.: Messung und Rechnung der Fundamentschwingungen von einfach wirkenden Viertakt-Maschinen. Dissertation Darmstadt 1916.	4
4.	Grimsehl, E.: Lehrbuch der Physik. Berlin 1923.	5
5.	Angenheister, G.: Seismische Registrierungen in Göttingen im Jahre 1905. Nachr. der kgl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathem.-physik. Kl. **1906**.	6
6.	Mintrop, L.: Über künstliche Erdbeben. Berichte des Internationalen Kongresses für Bergbau, angewandte Mechanik und praktische Geologie. Düsseldorf 1910.	8
7.	Mintrop, L.: Die Erdbebenwarte der Westfälischen Berggewerkschaftskasse in Bochum. Glückauf Nr. 11 u. 12. Essen 1909.	9
8.	Sieberg, A.: Erdbebenkunde. Jena 1923.	10
9.	Wiechert, E.: Theorie der automatischen Seismographen. Abh. d. kgl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathem.-physik. Kl. **1903**.	11
10.	Runge, C.: Theorie und Praxis der Reihen. Leipzig 1904.	14

Druck von Oscar Brandstetter in Leipzig.